

Berichte aus dem Institut für Meereskunde
an der Christian-Albrechts-Universität Kiel

Nr. 108

1982

Das statische Verhalten von Einpunktverankerungen
bei Anströmung

The static behavior of single-point moorings
in currents

von

Michael Schröder

DOI 10.3239 / IFM - BER - 108

Kopien dieser Arbeit sind erhältlich bei:

Michael Schröder
Institut für Meereskunde
Abt. Meeresphysik
Düsternbrooker Weg 20
2300 Kiel 1

ISSN 0341-8561

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Überblick über bekannte Verfahren	3
3. Einführung in die Problematik	5
4. Das Programm STASIP	9
4.1 Funktionsweise	9
4.2 Hauptprogramm	12
5. Physikalische und mathematische Grundlagen	14
6. Beschreibung der Unterprogramme	25
6.1 Unterprogramm FLESI	25
6.2 Unterprogramm PCIO	25
6.3 Unterprogramm JCD	25
6.4 Unterprogramm TRASI	26
6.5 Unterprogramm KONSI	29
6.6 Unterprogramm CALSI	33
6.6.1 Dehnungsverhalten von Kunststoffseilen	33
6.6.2 Dehnungsverhalten von Stahlseil	39
6.6.3 Dehnungsverhalten von Kevlar-Seilen	40
6.6.4 Ankerabweichung der Komponenten	41
6.7 Hilfsprogramm CURVE	41
6.8 Hilfsprogramm DBARM	44
7. Anwendung des Rechenprogramms	46
8. Übersicht über die verwendeten Verankerungen	47
9. Auswertung der Verankerungen im strömungs- losen Zustand	57
9.1 Grundlagen	57
9.2 Verankerung J 226	60
9.3 Vorbemerkungen zu den NEADS-Verankerungen	65
9.4 Verankerung N 184	68
9.5 Verankerung N 230	68
9.6 Verankerung N 264	72
9.7 Verankerung N 276-1	79

	Seite
10. Verhalten der Verankerungen N 184, N 230, N 276-1 und J 226 bei vereinfachten Stromprofilen	87
10.1 Vergleich des Verhaltens der NEADS- Verankerungen bei verschiedenen Strom- profilen	90
10.2 Einfluß unterschiedlicher Stromprofile auf die einzelnen Verankerungen	102
10.3 Abtauchverhalten der Verankerung J 226 bei unterschiedlichen Stromprofilen	102
11. Vergleich der Verankerungsbewegungen bei ge- mittelten aktuellen Stromprofilen	114
11.1 Auswahl der Meßdaten	114
11.2 Auswertung der Neigungsmesserdaten	142
11.3 Vergleich der Neigungswinkel	144
11.4 Auswertung der errechneten Verankerungs- Konfigurationen	146
12. Einfluß einzelner Parameter auf die Genauigkeit	153
12.1 Auftrieb und Gewicht	153
12.2 Reckberechnung des Perlonseils	156
12.3 Kenntnis des Stromprofils	157
12.4 Flächen und Widerstandsbeiwerte	157
13. Literaturverzeichnis	161

Contents

	Page
1. Preface	1
2. Review of known methods	3
3. Introduction to the problem	5
4. The program STASIP	9
4.1 General information	9
4.2 Main program	12
5. Physics and mathematical formulation	14
6. Description of the subprograms	25
6.1 Subprogram FLESI	25
6.2 Subprogram PCIO	25
6.3 Subprogram JCD	25
6.4 Subprogram TRASI	26
6.5 Subprogram KONSI	29
6.6 Subprogram CALSI	33
6.6.1 Elastic properties of synthetic ropes	33
6.6.2 Elastic properties of steel cable	39
6.6.3 Elastic properties of Parafil ropes	40
6.6.4 Displacement of mooring components from the anchor	41
6.7 Auxiliary program CURVE	41
6.8 Auxiliary program DBARM	44
7. Use of the computer program	46
8. Review of the selected moorings	47
9. Mooring behavior at zero current conditions	
9.1 Basic considerations	57
9.2 Mooring J 226	60
9.3 Introduction to the moorings in the NEADS area	65
9.4 Mooring N 184	68
9.5 Mooring N 230	68
9.6 Mooring N 264	72
9.7 Mooring N 276-1	79

	Page
10. Behavior of moorings N 184, N 230, N 276-1 and J 226 with simple current profiles	87
10.1 Comparison of the NEADS mooring behavior with different velocity profiles	90
10.2 Influence of profile form on individual moorings	102
10.3 Mooring response of J 226 with different velocity profiles	102
11. Comparison of mooring motion in actual mean velocity profiles	114
11.1 Selection of data	114
11.2 Interpretation of inclinometer data	142
11.3 Comparison of inclination data	144
11.4 Analysis of computed mooring configurations	146
12. Influence of various parameters on precision	153
12.1 Buoyancy and weight	153
12.2 Elasticity of Perlon rope	156
12.3 Knowledge of the current profile	157
12.4 Drag coefficients and component cross sections	157
13. References	161

Zusammenfassung:

In dieser Arbeit wird das Bewegungsverhalten von Einpunktverankerungen mit Hilfe eines Rechenprogramms untersucht, das zunächst von D.A. Moller an der Woods Hole Oceanographic Institution entwickelt worden war und hier auf Verankerungen des Instituts für Meereskunde Kiel angepaßt wurde. Zunächst werden fünf Meßanordnungen in der Ruhelage beschrieben, wobei Stromlosigkeit vorausgesetzt wird. Anschließend wird für sechs vereinfachte Stromprofile die Form diese Verankerungen berechnet. Mit einfachen Stromprofilen ist es möglich, je nach Stabilität der Verankerung Abtauchtiefen von mehr als 350 m zu erzeugen. Bei diesen hypothetischen Stromprofilen treten Horizontalauslenkungen der oberen Komponente von 1600 m und mehr bei einer Länge der Verankerung von etwa 5000 m auf.

Nach Abschätzung des grundsätzlichen Verhaltens werden aktuelle gemessene Daten der Stromgeschwindigkeit gemittelt. Hiermit wird die Form der Verankerungen berechnet, um die Wirkung wahrer Stromprofile auf diese Einpunktverankerungen beurteilen zu können. Dafür wurden jeweils Starkstromlagen sowie Zeiträume mit wenig Strom aus den Zeitreihen der Daten ausgewählt.

Das Verhalten der NEADS-Verankerungen wird bei allen Stromlagen gut reproduziert, jedoch mußten wegen mangelnder Überdeckung des Tiefenbereichs durch Meßgeräte einige Stromprofile durch Inter- bzw. Extrapolation ergänzt werden. Die JASIN-Verankerung läßt sich nur bei geringen Stromgeschwindigkeiten hinreichend gut berechnen, während in Phasen mit starkem Strom der Fehler groß ist. Dies ist unter anderem auf eine zusätzliche Markierungsboje an der Oberfläche zurückzuführen.

Zum Abschluß werden einige Hinweise zur Sensitivität des Simulationsprogramms auf bestimmte Verankerungsparameter gegeben, wobei der Reckberechnung von Perlonseil, der Genauigkeit des Stromprofils und der Bestimmung der verwendeten Auftriebe und Gewichte erhöhte Bedeutung zukommen.

Summary

The behavior of single-point moorings is studied in this report. The basic computer program used was first developed by D.A. Moller at the Woods Hole Oceanographic Institution, and it was adjusted to moorings of the Institut für Meereskunde Kiel. The form of the 5 moorings discussed here is first described assuming zero current conditions. Next, the stationary response is computed to six different simplified current profiles. Depending on mooring stability, vertical displacements beyond 350 m can be generated. The hypothetical current profiles lead to a horizontal deflection of 1600 m and more with 5000 m mooring length.

Next, measured current velocity data are averaged and used for determining the effect of these currents on single-point moorings. High and low current conditions are selected for this purpose.

The behavior of the NEADS moorings is well reproduced by the model at all conditions investigated here. Current profiles, however, have to be completed by "reasonable" vertical interpolation or extrapolation. The observed JASIN mooring behavior corresponds to the model prediction only during low current conditions, the error is large for strong currents. This is partly due to the drag exerted by a small surface marker buoy in large currents.

Finally, some results on the sensitivity of the model to variations in certain mooring parameters are presented. Effects are discussed that are related to changes in cable elongation, current profile, buoyancy and weight of components.

1. Einleitung

In der Ozeanographie hat die Bedeutung verankerter Meßsysteme mit automatischer Datenerfassung immer größere Bedeutung erlangt. Mit geringeren finanziellen Mitteln als Messungen von einem Forschungsschiff erfordern; sind so Langzeitmeßreihen der verschiedensten physikalischen Parameter in einem Meeresgebiet möglich. Durch diese ortsfesten Datenregistrierungen erhält man zum Beispiel Stromgeschwindigkeiten und Temperaturaufzeichnungen über den Zeitraum eines Jahres, die im Zusammenhang mit anderen Messungen Interpretationen barokliner geostrophischer Transporte oder des barotropen Strömungsfeldes erlauben.

Bei der Auswertung der Meßwerte müssen jedoch die Eigenbewegungen der Verankerung infolge Anströmung berücksichtigt werden, die die Aufzeichnung der ozeanographischen Daten erheblich verfälschen können. Insbesondere bei Einpunktverankerungen, die hier betrachtet werden sollen, kommen Horizontal- und damit verbunden auch Vertikalauslenkungen vor, die bis zu 40 % (10 %) der Seillänge betragen.

Es ist also sinnvoll, im voraus mit Hilfe eines Rechenprogramms die Bewegung der Verankerung zu simulieren und so Aussagen über die Konstruktion der auszulegenden Verankerung zu gewinnen. Durch Vergleiche von fünf im Institut für Meereskunde, Kiel, verwendeten Verankerungen im strömungslosen Zustand und in vereinfachten Stromprofilen, sollen das Anströmungsverhalten sowie spezifische Charakteristika dieser Verankerungen erarbeitet werden, die ein besseres Verständnis beim Vergleich mit gemittelten aktuellen Stromdaten ermöglichen.

Durch Vergleiche der Druckdaten mit den errechneten Instrumententiefen einerseits und der gemessenen Seilneigungen zu den berechneten andererseits wird die Güte des Rechenprogramms abgeschätzt. Zu diesem Zweck werden jeweils Starkstromphasen und Bereiche geringer Stromgeschwindigkeit aus den Verankerungsdaten ausgesucht und die Programmgenauigkeiten verglichen. Schließlich werden noch Einflüsse der unterschiedlichen Verankerungsgrößen auf das Bewegungsverhalten untersucht.

2. Überblick über bereits bekannte Verfahren zur Berechnung von Verankerungsbewegungen.

Bereits seit dem ersten Weltkrieg gibt es Arbeiten, die sich mit der Anordnung zweidimensionaler Seile im statischen Gleichgewicht befassen. Später kamen dann dynamische Betrachtungen dieser Systeme hinzu.

Wichtige Arbeiten über das statische Verhalten von Verankerungen entstanden durch Pode (1951), der Tabellen für die Kabelkonfiguration steifer Einpunktverankerungen mit konstantem tangentialen Strömungswiderstand erstellte. Dabei wurde als Voraussetzung ein konstanter Strom angenommen. Später erweiterte Wilson (1960, 1961) die Berechnungen auf variable tangentielle Strömungswiderstände und auf variable Strömungen. Übersicht über die Verfahren, die bis 1969 entstanden sind, gibt die Arbeit von Casarella, Parsons (1969). Sie enthält auch zahlreiche Literaturhinweise, die bei der Bearbeitung spezieller Probleme nützlich sein können. Einen ähnlich guten Überblick verschafft der Bericht von Dillon (1973), der sich mit den mathematischen Modellen zur Lösung dynamischer Fragestellungen aller Arten von wissenschaftlichen Verankerungen befaßt.

Einige weitere wichtige Arbeiten wurden von Siedler (1970) durchgeführt, der insbesondere die Frage der Zahl und Verteilung der Auftriebselemente durch Reduzierung des Problems auf ein starres Pendel klärte.

Etwa zur gleichen Zeit entstanden in der Woods Hole Oceanographic Institution einige Berichte und Computerprogramme von Berteaux (1970), Berteaux & Chhabra (1973) sowie Millard (1969)

die sich mit diversen Problemen von Oberflächen- und Unterwasserverankerungen beschäftigen. Dabei ist das gleichzeitig entstandene Buch "Buoy Engineering " von H.O. Berteaux als gute Einführung in den gesamten Fragenkomplex zu sehen.

Im Jahre 1974 wurde während des GATE-Experiments durch Siedler und Gerlach die Möglichkeit geschaffen, die Konfiguration eines speziellen Verankerungstyps, die im IfM Kiel entwickelte H-Verankerung, bei verschiedener Anströmung vorauszuberechnen (Siedler & Gerlach, 1976).

3. Einführung in die Problematik.

Bei den im Kieler Institut für Meereskunde eingesetzten Verankerungen handelt es sich hauptsächlich um Einpunktverankerungen in der Tiefsee, deren oberste Komponente unterhalb der seegangsbeeinflussten Schicht liegt. Ihre Einsatztiefen liegen zwischen 500 und 5500 m.

Diese großen Längen, sowie die große Zahl der sich in der Verankerung befindenden Instrumente und Auftriebskörper, ergeben eine Fläche von bis zu 70 m^2 . Maximal 20 % dieser nehmen die Instrumente ein und bilden somit für die vorhandenen Strömungen eine große Angriffsfläche. Die Folge davon ist, daß sich die Verankerung aus ihrer Ruhelage herausneigt und , dabei die Instrumente in größere Tiefen als vorgesehen absacken. Gleichzeitig ändert sich der Lotpunkt jeder Komponente in bezug auf den Ankerstein, und die Zugkraft im Seil nimmt zu (Bild 1 u. 2). Um diese Veränderungen infolge Anströmung im voraus für jede einzusetzende Verankerung zu bestimmen und damit einen Überblick über etwaige Konstruktionsmängel zu bekommen, ist es sinnvoll, ein Rechenprogramm zu entwerfen, das in der Lage ist, schnell und möglichst exakt eine Berechnung all dieser Veränderungen vorzunehmen.

Mit hinreichender Genauigkeit wird es genügen, sich zunächst einen Einblick in das statische Verhalten der Verankerungen zu verschaffen. Als geeignetes Programm wurde ein Dialogprogramm von D.A. Moller WHOI (1976) verändert und für die Erfordernisse des IfM aufgearbeitet. Anschließend wurden fünf Verankerungen mit unterschiedlicher Instrumenten- und Seilbestückung sowie verschiedenen Einsatztiefen für mehrere

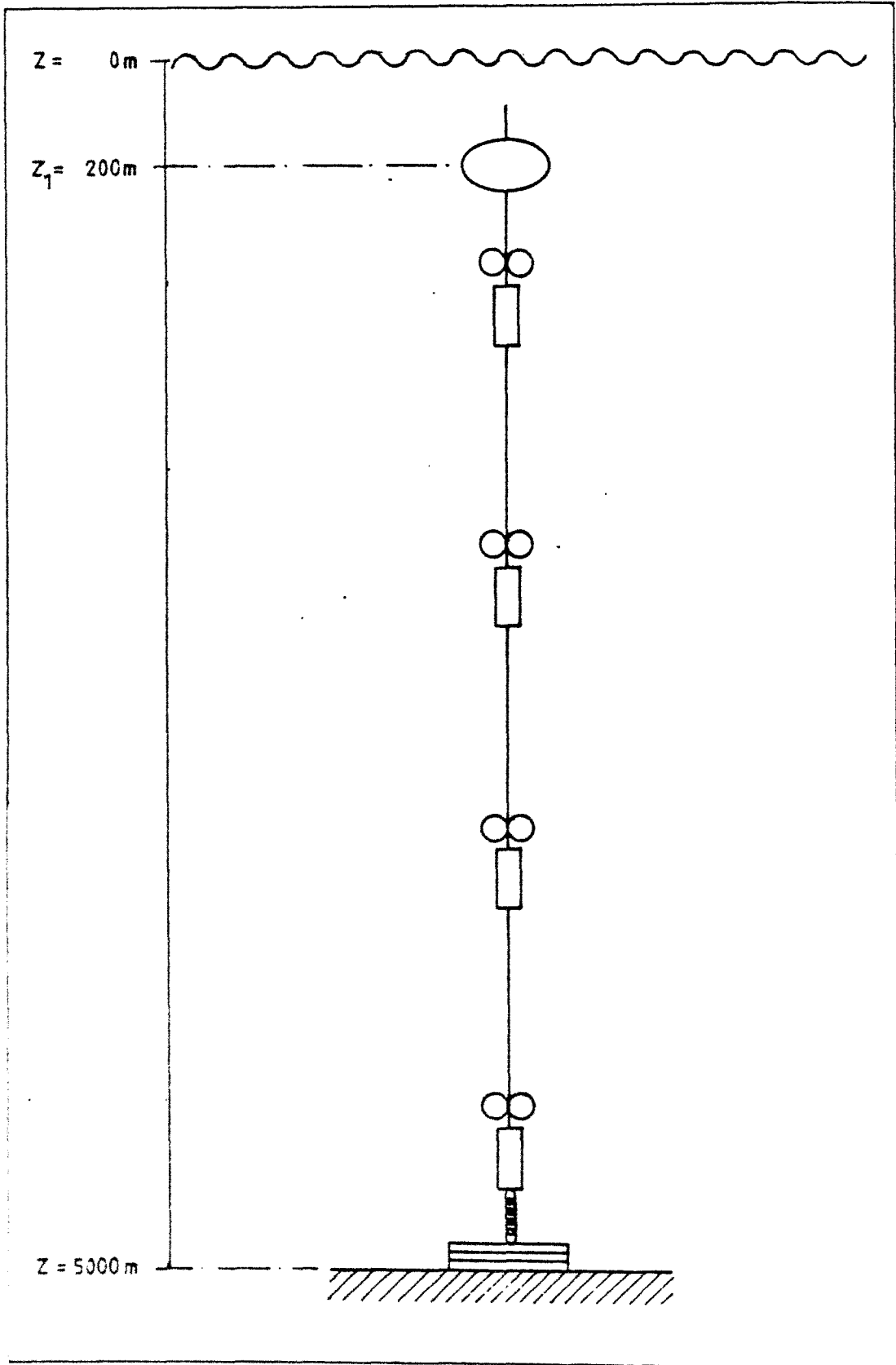


Bild 1

vereinfachte Stromprofile gerechnet.

Später wurden dann die Stromdaten, die von den jeweiligen Instrumenten in der Verankerung gemessen wurden, in das Programm eingegeben, um die reale Tiefenlage der Meßgeräte zu bestimmen. Anhand von Druckregistrierungen konnten dann die Abweichungen bestimmt werden.

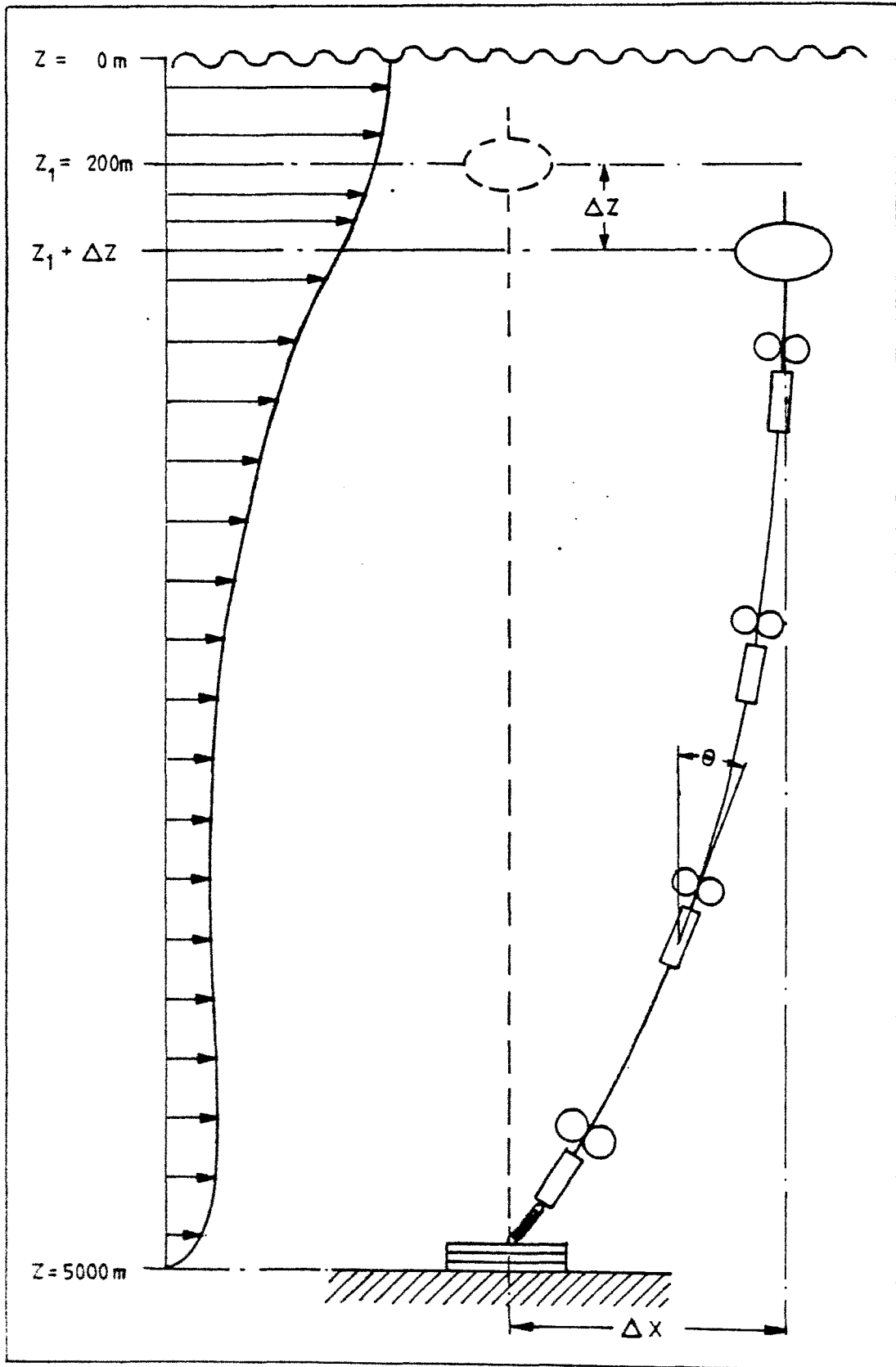


Bild 2

4. Beschreibung des zugrundeliegenden Programms:

Als Grundlage für diese Arbeit wurde ein Berechnungsprogramm der Woods Hole Oceanographic Institution von Donald A. Moller aus dem Jahre 1976 genommen. Dieses wurde für die Rechenanlage des Instituts für Meereskunde an der Universität Kiel (PDP-11) in FORTRAN IV plus umgeschrieben und für die Erfordernisse der hier verwendeten Verankerungskomponenten entsprechend geändert. Außerdem wurde das Programm für die Bearbeitung und Erstellung von Datenfiles erweitert.

Zusätzlich dazu wurden kleine Hilfsprogramme geschrieben, die die Aufbereitung von Daten erleichtern, so z.B. Umrechnung von dbar in Meter sowie Erzeugung von vereinfachten Stromprofilen.

4.1 Funktionsweise des Programms STASIP:

(Statics of Single Point Moorings)

Durch den Aufbau als Dialogprogramm ist es möglich, in schneller Folge verschiedene Verankerungskonfigurationen und Stromprofile mit diesem Programm zu rechnen. Durch gleichzeitige Erstellung von Datenfiles ist eine rasche Verarbeitung und Interpretation der unterschiedlichen Fälle möglich. Wie Bild 3 verdeutlicht, besteht das Programmpaket aus dem Hauptprogramm STASIP sowie 6 Unterprogrammen, die jedes für sich einen anderen wesentlichen Teil der Berechnungen durchführen. Dazu kommt noch das Hilfsprogramm CURVE, welches in kurzer Zeit beliebige, vereinfachte Stromprofildateien erstellt, die wiederum ins Hauptprogramm eingegeben werden können.

Diese Aufteilung in etwa gleichgroße Blöcke kommt einer Aufbereitung mit Hilfe von overlays zugute, falls das Programm auf kleineren Rechnern z.B. der NOVA wie auf den Institutschiffen laufen soll. Damit ist eine Bearbeitung der Verankerungsbewegungen und Anordnung vor Ort, d.h. auf Forschungsschiffen ohne weiteres möglich. Voraussetzung für einen Rechenlauf ist, daß sowohl die Anordnung der Verankerung als Lochkartensatz oder Datenfile wie auch das zu rechnende Stromprofil als Datenfile vorliegen. Ist dies nicht der Fall, können sämtliche Daten über die Bildschirmtastatur eingegeben werden, was allerdings ungleich mühsamer und zeitaufwendiger ist.

Um möglichst viele Daten und Charakteristika der einzelnen Komponenten der Verankerung zur Verfügung zu haben, sind diese bereits in einem der Unterprogramme gespeichert. Da die Komponenten nur mittels einer Codenummer aufgerufen werden, stehen alle Daten dieser Komponente sofort zur Verfügung und brauchen nicht einzeln eingegeben zu werden.

Einen Überblick über die Input- und Output-Daten gibt Zeichnung 4. Dabei ist zu beachten, daß die Ausführlichkeit des ausgedruckten Protokolls zu Beginn jedes Rechenlaufs frei wählbar ist.

Große Flexibilität erreicht der Benutzer des Programms durch einen Wahlschalter, der ihm 18 verschiedene Änderungs- und Eingriffsmöglichkeiten im Programm gestattet. Es ist so fast jede Änderung im Programmlauf und im Aufbau der Verankerung möglich, so daß etwaige Fehler in der Konstruktion der Verankerung sofort behoben werden können.

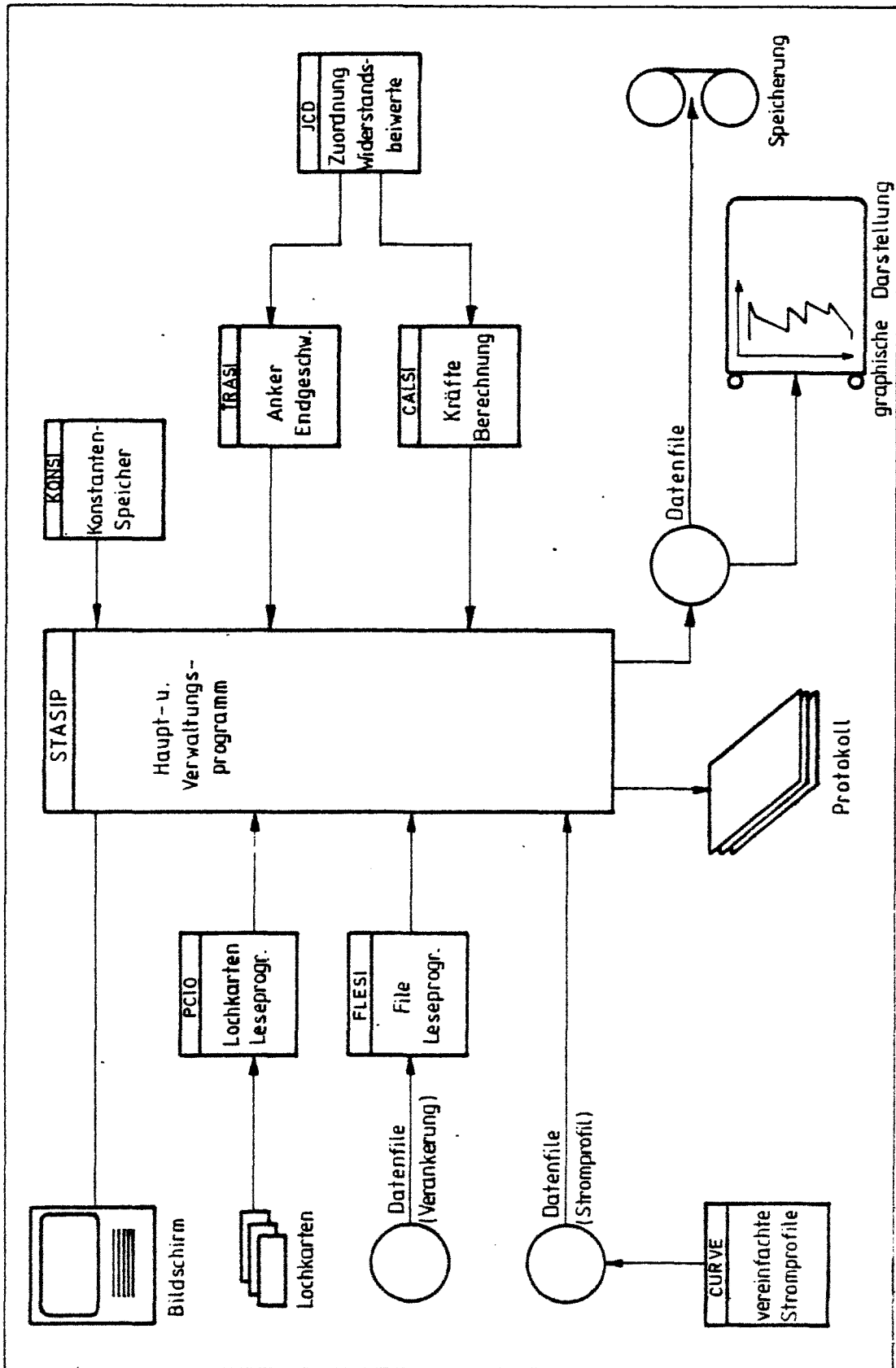


Bild 3

Eine Liste der Wahlmöglichkeiten sowie Erklärungen zur Handhabung des Programms befinden sich im IfM-Bericht Nr. 109

4.2 Das Hauptprogramm STASIP:

(Statics of single point moorings)

Hierbei handelt es sich um das Verwaltungszentrum des gesamten Rechenlaufs. In ihm werden die Ein- und Ausgabe-prozeduren sowie die richtige Reihenfolge der auszuführen-den Berechnungen gesteuert. Jede gewünschte Veränderung der Berechnung über die 18 Wahlmöglichkeiten wird folge-richtig eingebaut und die sich daraus ergebende neue Berech-nung unter einem vom Benutzer einzugebenden Namen als Daten-file abgelegt. Man erhält also für jede Veränderung (Abände-rung) der Verankerung einen eigenen Datenfile, der für sich einzeln ausgewertet werden kann. Eine zusätzliche Information bieten die Ausdrücke über Lineprinter, die je nach Wahl kurz oder ausführlich gehalten werden können.

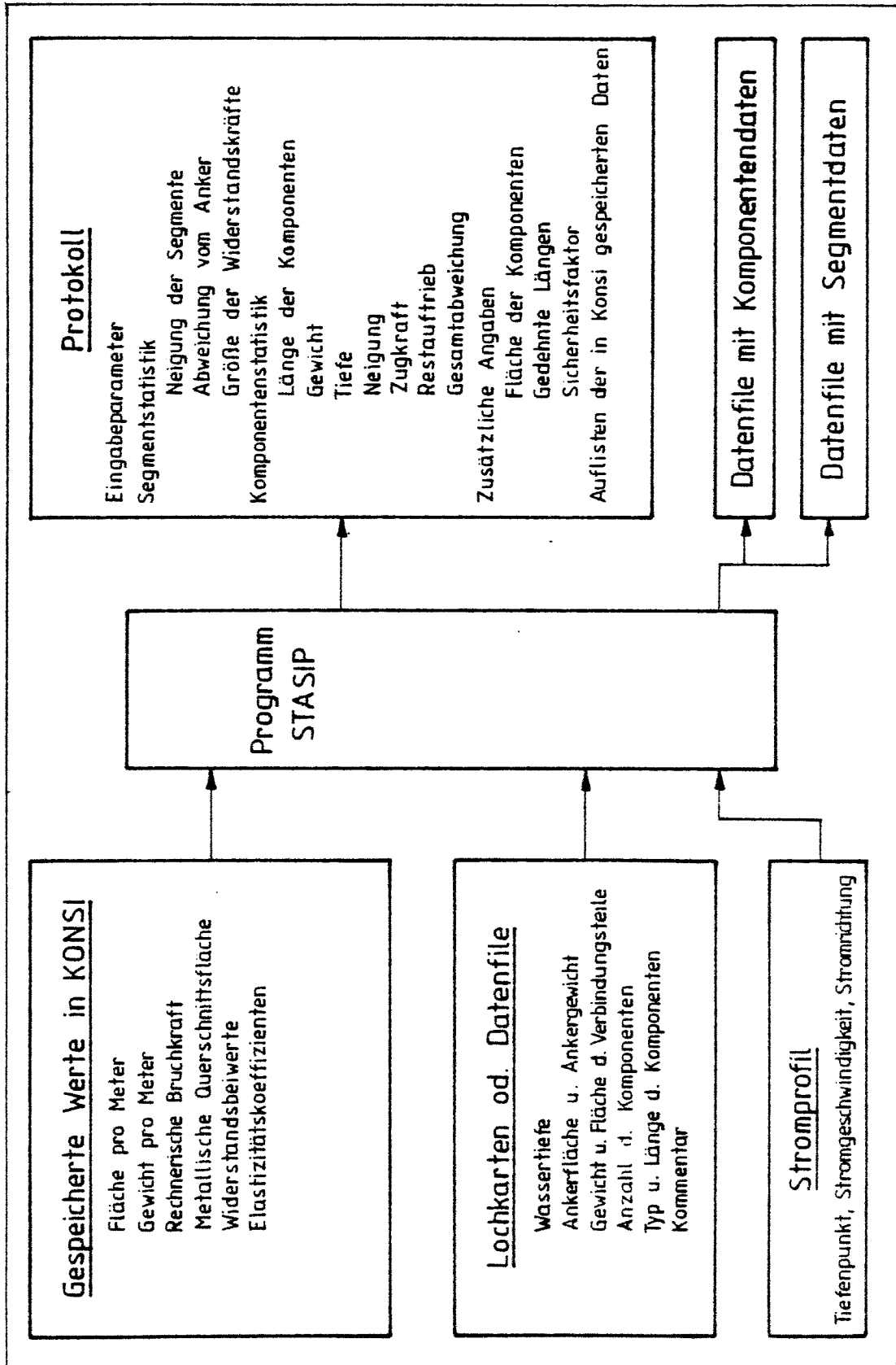


Bild 4

5. Physikalische und mathematische Grundlagen:

Das Programm STASIP gibt eine Möglichkeit, die statische Verteilung einer Unterwasserverankerung zu berechnen, um einen Überblick über die geeignete Konstruktion und die daraus folgenden Einsatzmöglichkeiten zu gewinnen.

In einem variablen horizontalen Strömungsfeld wird die Verankerung infolge der auftretenden Strömungswiderstände eine andere räumliche Verteilung annehmen als in der Ruhelage ohne Strom. Nimmt man an, daß keine bedeutenden Änderungen der Zugkraft im Seil dabei auftreten, der Auftrieb ändert sich bei Neigung des Systems nicht (Siedler, Gerlach, 1976), so wird sich das statische Gleichgewicht einstellen, wenn sich die Komponenten der beteiligten Kräfte durch veränderte Winkelanordnungen aufheben. Dabei resultiert aus der horizontalen Ablenkung ein vertikales Abtauchen der einzelnen Komponenten der Verankerung.

Durch eine Iteration werden die Gleichgewichtsbedingungen erstellt. Für immer neue, angenommene Strömungsprofile wird die Anordnung der Verankerung errechnet, wobei in jedem Iterationsschritt eine geschätzte Tiefe der obersten Komponente berechnet wird. Stimmt die berechnete Tiefe mit der geschätzten Tiefe überein, d.h. beträgt die Differenz weniger als 2 Meter, sind das geschätzte und das wahre Stromprofil identisch. Damit ist die errechnete räumliche Verteilung der Verankerung im statischen Gleichgewicht. Mittels der Methode der finiten Elemente werden die Gleichgewichtsbedingungen von Seilstücken infinitesimaler Länge

auf Seilstücke endlicher Länge übertragen. Dazu müssen die Komponenten der Verankerung in eine Anzahl von Segmente gleicher Länge unterteilt werden. Die Länge ist vom Benutzer des Programms frei wählbar, allerdings ist zu beachten, daß eine größere Anzahl die Genauigkeit der Rechnung erhöht. Diese Segmente werden als starre Zylinder mit gelenkiger Verbindung an den Enden angenommen. Auf jedes Segment wirken Gewicht oder Auftrieb sowie die Widerstandskräfte, die im statischen Gleichgewicht die äußeren, durch den Zug im Seil hervorgerufenen Zwangskräfte ausgleichen.

Dazu müssen iterativ die Neigungswinkel jedes Segments (Azimuthwinkel und Vertikalwinkel) errechnet werden, bis die Differenz zweier folgender Iterationen kleiner als 0,1 Grad ist. Danach sind jetzt alle anderen Größen berechenbar. Die Zeichnung 5 veranschaulicht die räumliche Verteilung der durch das Stromprofil hervorgerufenen Kräfte. Das Seil bildet durch seine Neigung eine Vorzugsebene (schraffiert), die um den Winkel φ aus Nord gedreht ist. Sie steht für jedes Segment senkrecht auf der Horizontalebene x, y .

In ihr liegen die Kräfte F_T und F_F

F_T = Tangentialkomponente der Widerstandskraft

F_F = Normalkomponente der Widerstandskraft, die
für die Neigung des Seils verantwortlich ist.

Der Neigungswinkel in einem Punkt des Seils aus der Vertikalen ist θ .

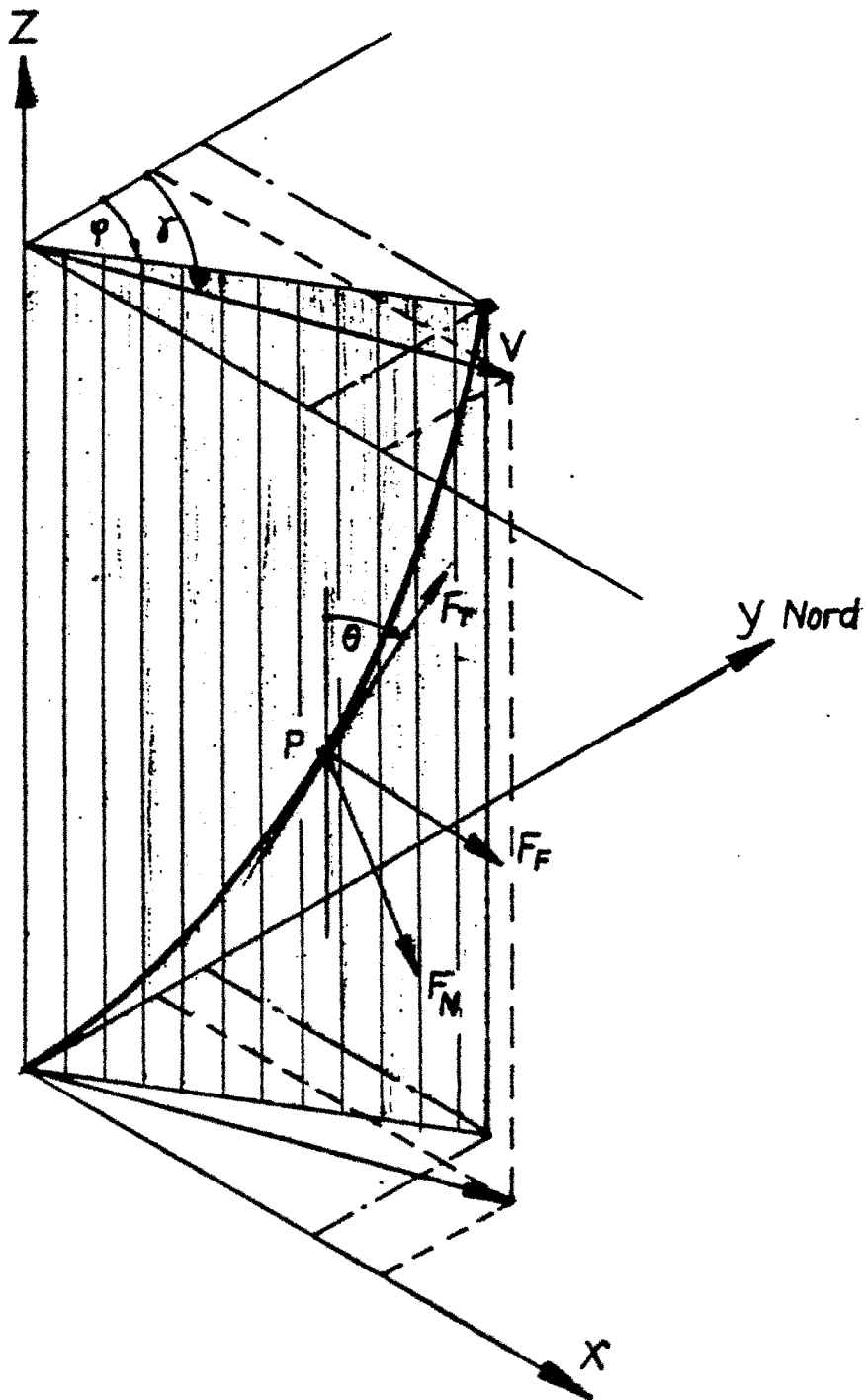


Bild 5

Räumliche Verteilung der durch das
Stromprofil hervorgerufenen Kräfte

Senkrecht zur Vorzugsebene liegt die Kraft F_N .

F_N = Normalkomponente der Widerstandskraft, die die Drehung der Vorzugsebene bewirkt.

Hervorgerufen werden alle drei Kräfte durch den horizontalen Stromvektor V , der im Punkt P angreift. Zur besseren Darstellung ist er räumlich verschoben gezeichnet.

Der Stromvektor ist um den Winkel δ aus Nord gedreht.

Weil der Strömungsvektor nicht parallel zur Vorzugsebene des Seils liegt, sondern um den Winkel $(\delta - \varphi)$ verschoben ist, muß man ihn in seine Komponenten zerlegen. Diese sind, wie Zeichnung 6 zeigt, V_F und V_N

V_F = Komponente des Stromvektors, die in der Seilebene liegt

V_N = Normalkomponente des Stromvektors senkrecht zur Seilebene.

Rechnerisch ergibt sich:

$$V_F = V \cdot \cos (\delta - \varphi) \quad (1)$$

$$V_N = V \cdot \sin (\delta - \varphi) \quad (2)$$

Um die Kräfte zu erhalten, die im Punkt P des Seils wirken, muß die Komponente V_F des Stromvektors wiederum in ihre durch das Seil vorgeschriebenen Anteile V_T und V_{TN} zerlegt werden.

V_T = Tangentialkomponente des Stromvektors V

V_{TN} = Normalkomponente des Stromvektors V senkrecht zum Segment des Seils

für beide gilt dann

$$\begin{aligned} V_T &= V_F \cdot \cos (90 - \theta) \\ &= V \cdot \cos (\delta - \varphi) \cdot \cos (90 - \theta) \\ V_T &= V \cdot \cos (\delta - \varphi) \cdot \sin \theta \quad (3) \end{aligned}$$

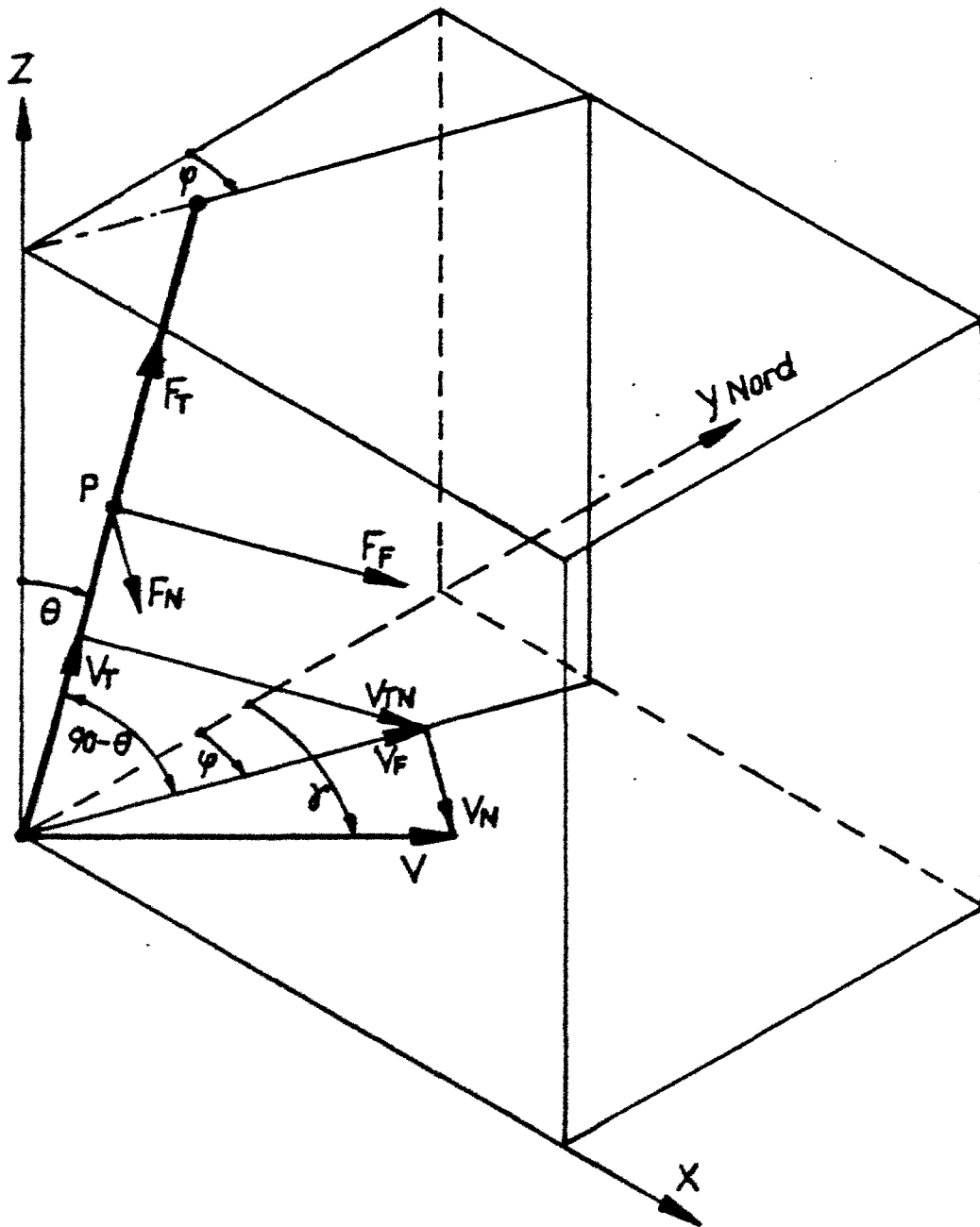


Bild 6

Komponentenzerlegung der angreifenden Kräfte

$$\begin{aligned}
 V_{TN} &= V_F \cdot \sin (90 - \theta) \\
 &= V \cdot \cos (\gamma - \varphi) \cdot \sin (90 - \theta) \\
 V_{TN} &= V \cdot \cos (\gamma - \varphi) \cdot \cos \theta \quad (4)
 \end{aligned}$$

Man erhält also drei Stromkomponenten, die auf das Segmentstück der Verankerung wirken.

V_N , V_T , V_{TN} gegeben durch die Gleichungen (2), (3) u. (4). Aus diesen drei Stromkomponenten lassen sich jetzt die Widerstandskräfte berechnen, die im Punkt P angreifen.

Allgemein gilt:

$$F_W = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \quad (5)$$

ρ = Dichte des Wassers (Kg/m^3)

C_D = Widerstandsbeiwert

A = charakteristische Fläche (m^2)

V = Geschwindigkeit der Strömung (m/s)

F_W = Widerstandskraft in (Kp)

Damit ergeben sich die Widerstandskräfte

F_N = Widerstandskraft normal zur Seilebene

F_F = Widerstandskraft normal zum Seil aber in der Seilebene liegend

F_T = tangentielle Widerstandskraft

$$\text{zu } F_N = \frac{1}{2} \rho C_{DN} A_L l |V \cdot \sin (\gamma - \varphi)| V \cdot \sin (\gamma - \varphi) \quad (6)$$

$$F_F = \frac{1}{2} \rho C_{DN} A_L l |V \cdot \cos (\gamma - \varphi)| V \cdot \cos (\gamma - \varphi) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho C_{DT} A_L l |V \cdot \cos (\gamma - \varphi) \cdot \sin \theta| V \cdot \cos (\gamma - \varphi) \cdot \sin \theta \quad (8)$$

Dabei sind:

A_L = Fläche pro Meter Länge des Segments (m^2/m)

l = Länge des Segments (m)

A_L wird benutzt, weil diese Angabe für jedes Segment im Unterprogramm KONSI gespeichert ist. Zusätzlich zu den Widerstandskräften wirkt im Punkt P noch die in ihre Komponenten zerlegte Auftriebskraft des Segments.

Für jedes Segment gilt für die Auftriebskraft

$$F_S = F_{SL} \cdot l \quad (9)$$

mit F_S = Summe aus Gewicht und Auftrieb (Kp)

F_{SL} = positiver oder negativer Auftrieb pro
Einheitslänge (Kp/m)

l = Länge des Segments (m)

In Komponenten ergibt sich

$$F_{SN} = F_S \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$F_{ST} = F_S \cdot \cos \theta \quad (11)$$

θ = Winkel zur Vertikalen

F_{SN} = Normalkomponente der Auftriebskraft

F_{ST} = Tangentialkomponente der Auftriebskraft

Gleichgewichtsbedingungen:

Im statischen Gleichgewicht müssen sich Auftriebskraft und Widerstandskräfte mit den äußeren Zwangskräften, d.h. mit den Zugkräften im Seil balancieren. Dabei werden die Gleichgewichtsbedingungen iterativ für jedes Segment bestimmt und durch tangentiale Zugkraft, Vertikalwinkel und Azimutwinkel beschrieben. Zeichnung 7 gibt einen Überblick über die Kräfteanordnung zweier zueinander geneigter Segmente. Denkt man sich jetzt alle Kräfte in einem Punkt angreifend, wie in Bild 8 und Bild 9 als Seitenansicht und Drauf-

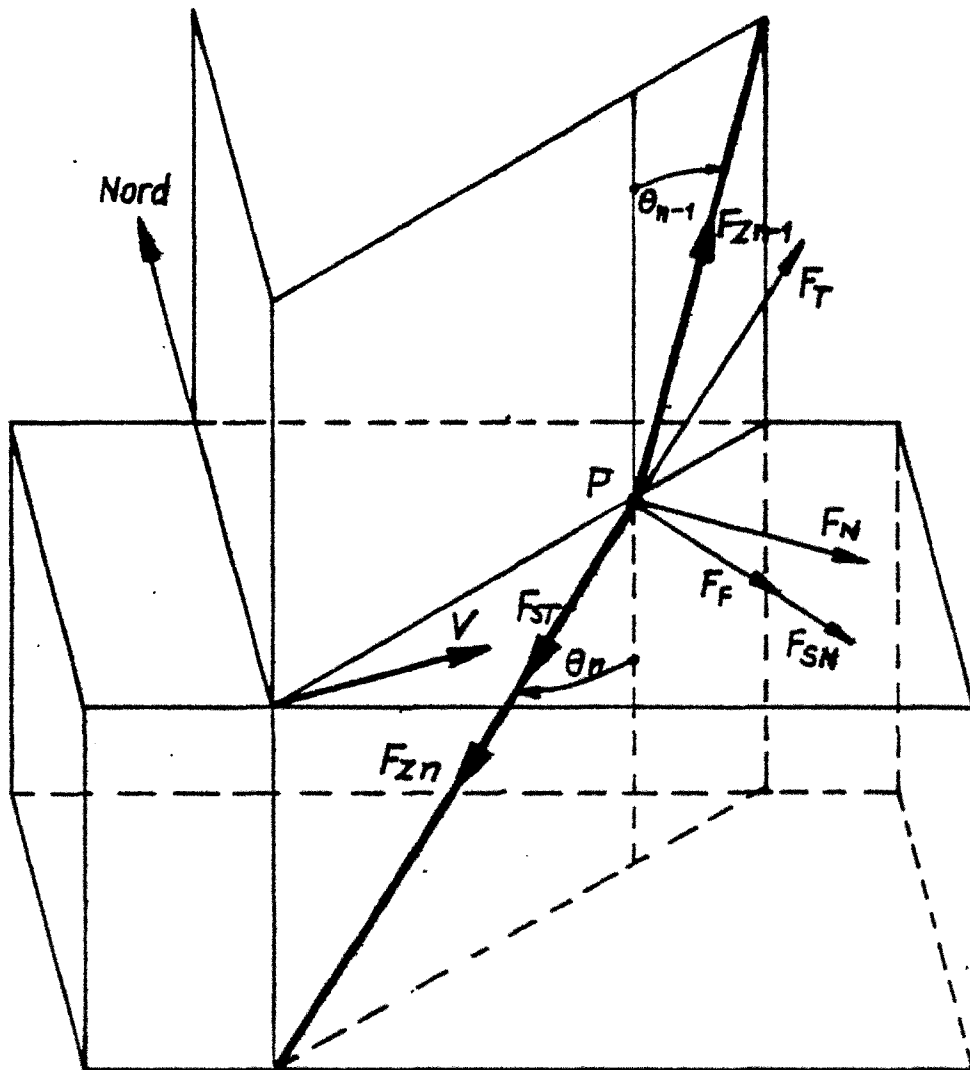


Bild 7

Kräfteanordnung zweier zueinander
geneigter Seilsegmente

sicht dargestellt, so muß im Gleichgewichtszustand die vektorielle Summe der Kräfte im Krafteck Null ergeben.

Daraus ergeben sich folgende Bedingungen

$$F_{ST} + F_T = F_{z_n} - F_{z_{n-1}} \cdot \cos(\theta_n - \theta_{n-1}) \quad (12)$$

$$F_{SN} + F_F = F_{z_{n-1}} \cdot \sin(\theta_n - \theta_{n-1}) \quad (13)$$

sowie

$$F_N = F_{z_{n-1}} \cdot \sin \theta_{n-1} \cdot \sin(\varphi_n - \varphi_{n-1}) \quad (14)$$

$$F_{z_n} \cdot \sin \theta_n = F_{z_{n-1}} \cdot \sin \theta_{n-1} \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_{n-1}) \quad (15)$$

F_z = Zugkraft im Seil ; $n, n-1$ = Index für Segmente
Die Konvergenzbedingungen für die Annäherung an den Gleichgewichtszustand lauten

$$\theta_n = \Delta \theta + \theta' \quad (16)$$

$$\varphi_n = \Delta \varphi + \varphi' \quad (17)$$

mit θ' = Vertikalwinkel der vorangegangenen Iteration

φ' = Azimuthwinkel " " "

$\Delta \theta, \Delta \varphi$ = Winkeldifferenzen zweier aufeinander folgender Iterationen

Ersetzt man in Gleichung 12) - 14) θ_n, φ_n durch θ', φ' und berechnet $\Delta \theta$ und $\Delta \varphi$ so ergeben sich die Gleichungen

$$F_{z_n} = F_{z_{n-1}} \cdot \cos(\theta' - \theta_{n-1}) + F_{ST} + F_T \quad (18)$$

$$\theta_n = \arctan \left[\frac{F_{SN} + F_F - F_{z_{n-1}} \cdot \sin(\theta' - \theta_{n-1})}{F_{z_n}} \right] + \theta' \quad (19)$$

$$\varphi_n = \arctan \left[\frac{F_N - F_{z_{n-1}} \cdot \sin \theta_{n-1} \cdot \sin(\varphi' - \varphi_{n-1})}{F_{z_n} \cdot \sin \theta_n} \right] + \varphi' \quad (20)$$

Da Auftriebskraft und Widerstandskräfte bei jeder Iteration mit den Werten θ' und φ' neu errechnet werden, konvergieren die $\Delta \theta$ und $\Delta \varphi$ -Werte gegen Null. Gleichgewicht wird an-

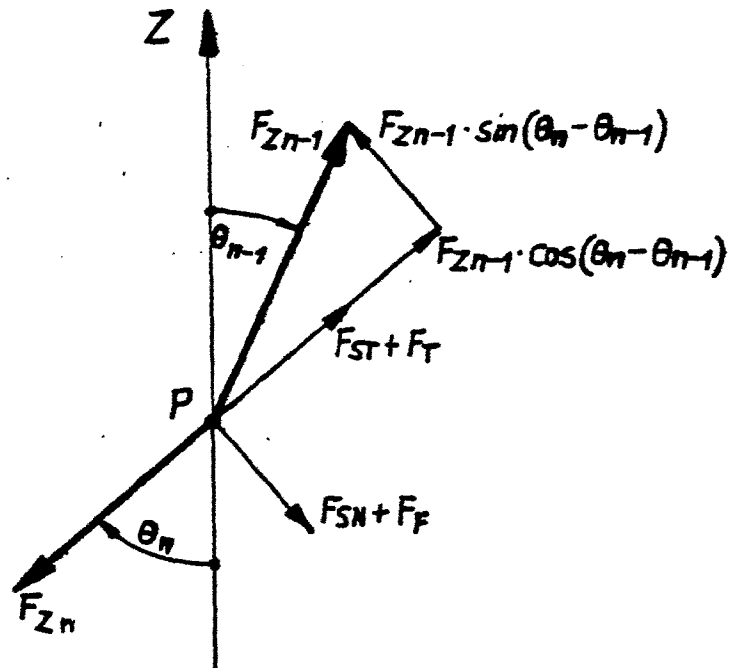


Bild 8 Seitenansicht der in Punkt P angreifenden Kräfte

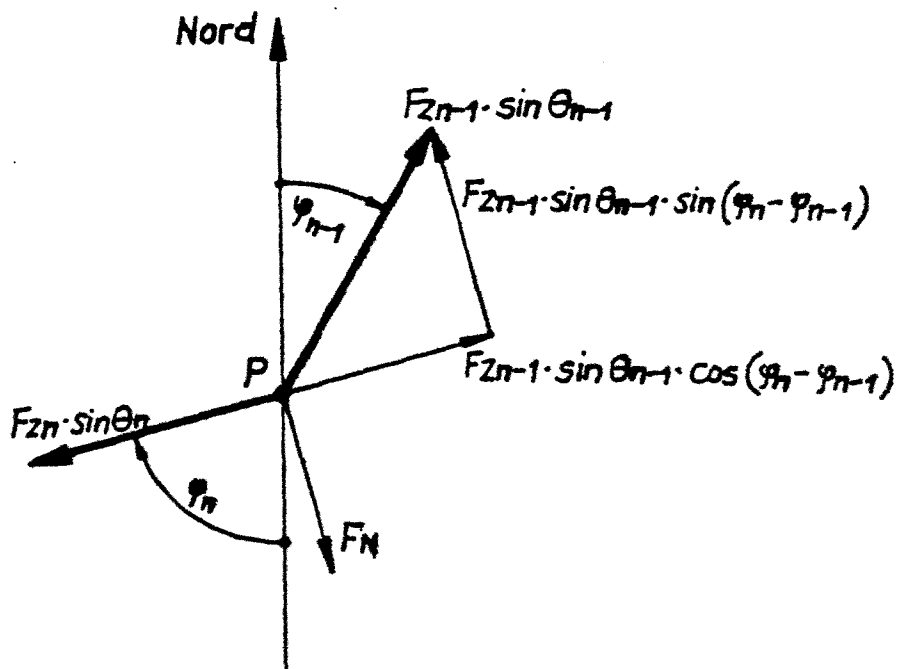


Bild 9 Draufsicht der in Punkt P angreifenden Kräfte

genommen, wenn die Winkeldifferenz zweier folgender Iterationen weniger als 0,1 Grad beträgt. Zu Beginn jedes neuen Iterationsschrittes werden die errechneten Werte Θ_n, φ_n als $\Theta_{n-1}, \varphi_{n-1}$ in das Programm gegeben. Startwerte für die Iterationen sind die Werte der von außen angreifenden Kraft an der obersten Verankerungskomponente.

6. Beschreibung der Unterprogramme.

6.1 Das Unterprogramm FLESI:

Dieses Programm dient zum Lesen vorhandener Datenfiles für die Verankerungskomponenten auf Magnetband und wurde eingebaut, um an Bord unabhängig von Kartenleser oder Lochstreifenleser zu sein.

6.2 Das Unterprogramm PCIO:

Sollen Lochkarten gelesen werden, steuert diese Subroutine mit zwei verschiedenen Möglichkeiten die Eingabe der Parameter. Handelt es sich um Standardverankerungen (Normalfall), braucht nur ein minimaler Kartensatz eingegeben zu werden. Dieses ist auch der Fall bei der routinemäßigen Befragung während des Programmlaufs, ob die Daten über Kartenleser eingelesen werden sollen. Will man jedoch auch die gespeicherten Daten im Unterprogramm KONS I auf breiter Basis ändern, so kann man dies über den Wahlschalter No. 15 tun. Außerdem ist zur Kontrolle ein Ausdruck des maximalen Kartensatzes auf Lineprinter über Wahlschalter No. 16 möglich. Sollte ein Kartenstanzer zur Verfügung stehen, kann über Wahlschalter 16 unter vorhergehender Eingabe der logischen Verzweigungsnummer L0 3 des Kartenlesers, auch der maximale Kartensatz gestanzt werden.

6.3 Das Unterprogramm JCD:

In diesem Programmteil wird den einzelnen Verankerungskomponenten mittels der Code No. IT der jeweils benötigte Widerstandsbeiwert sowohl normal als auch tangential während der Berechnungen zugeordnet.

6.4 Das Unterprogramm TRASI:

Speziell für Berechnungen während des Fallens des Ankers werden hier die im Seil auftretenden Spitzenbelastungen (maximale Zugkräfte) und die Endgeschwindigkeit des Ankers und damit der ganzen Verankerung berechnet.

Ein Körper schwerer als Wasser wird beim Absinken unter dem Einfluß der Erdbeschleunigung immer schneller werden. Durch seine zunehmende Geschwindigkeit wird allerdings auch der Strömungswiderstand des Körpers erhöht, so daß von einem gewissen Punkt abwärts, diese beiden entgegengesetzten Kräfte im Gleichgewicht sind und der Körper mit konstanter Geschwindigkeit webersinkt. Diese berechnet sich aus:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho c_D A v^2 \quad \text{sowie} \quad F_s = G - B$$

bei Endgeschwindigkeit gilt: $F_s = F_w$

$$v_E = \sqrt{\frac{2(G-B)}{\rho c_D A}}$$

F_w = Widerstandskraft (Kp)

F_s = Summe aus Gewicht und Auftrieb (Kp)

G = Gewicht des Körpers (Kp)

B = Auftrieb des Körpers (Kp)

c_D = Widerstandsbeiwert

A = Fläche des Körpers (m^2)

v = Anströmgeschwindigkeit (m/s)

ρ = Dichte des Wassers (Kg/m^3)

Geht man von einem Körper über zu einer Verankerung mit diversen Komponenten, so ergibt sich daraus (Moller 76)

$$v_E = \sqrt{\frac{2(G_R - B_K)}{\rho(\sum c_{D_i} A_i + c_{D_R} A_R)}}$$

dabei ist G_A = Gewicht des Ankers in (Kp)

B_k = Netto-Auftrieb aller Komponenten oberhalb
des Ankers (Kp)

$\sum C_{0A}$ = Summe der Produkte von Widerstandsbeiwert
mal angeströmter Fläche (m^2)

A_A = effektive Fläche des Ankers (m^2)

C_{0A} = Widerstandsbeiwert des Ankers (m^2)

Das heißt, die berechnete Endgeschwindigkeit ist dann erreicht,
wenn sämtliche Komponenten der Verankerung abgetaucht sind
und die Verankerung bis zum Aufsetzen des Ankersteins auf
dem Boden weitersinkt.

In die effektive Fläche des Ankers muß bei Benutzung eines
Fallschirms die Fläche des Schirms mit eingerechnet werden.
Die im Institut für Meereskunde benutzten Schirme haben
folgende Ausmaße:

$$d = 1,50 \text{ m}$$

$$\text{mit Loch von } d = 0,20 \text{ m}$$

Daraus ergibt sich eine Fläche von 4 m^2

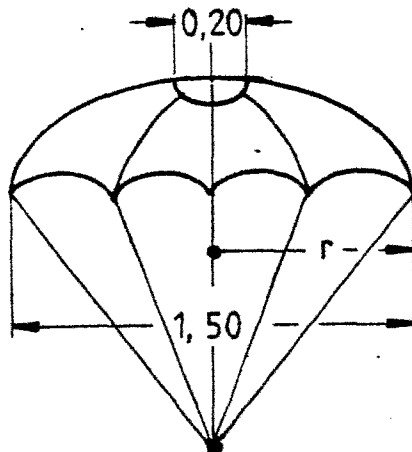


Bild 10

Bremsfallschirm am
Anker

Durch die Arbeitsweise beim Auslegen, nämlich zuerst die Boje und zuletzt den Anker zu slippen, wie Siedler und Grashoff in KMF XXVI, 1970, zeigen, ergeben sich Spitzenwerte im Seilzug, wenn der Anker in einer Tiefe angelangt ist, in der das Seil straff wird und sich zu recken beginnt. Die maximale Zugkraft wird dann direkt kurz vor Erreichen des Ankers auf dem Boden erreicht (Berteaux & Walden, Ref. No. 64 - 36). Allgemein berechnet sich die maximale Zugkraft durch

$$F_{Z \max}(h) = G_A + G(h) - B(h)$$

$F_{Z \max}(h)$ = maximale Zugkraft im Pkt im Abstand h vom Anker

G_A = Gewicht des Ankers

$G(h)$ = Gewicht aller Komponenten vom Anker bis zum Pkt im Abstand h vom Anker

$B(h)$ = Auftrieb aller Komponenten vom Anker bis zum Pkt im Abstand h

Im Programm wird diese vorübergehende Spitzenbelastung in jeder Komponente errechnet durch

$$F_{zi} = \sum_{k=1}^i B_{ki} + \frac{1}{2} \rho V_E^2 \sum_{k=1}^i C_o A$$

F_{zi} = Zugkraft in Komponente i in (Kp)

$\sum_{k=1}^i B_{ki}$ = Summe der Auftriebe von Komponente 1 bis i und Gewichte (Kp)

V_E = Endgeschwindigkeit des Ankers in (m/s)

$\sum_{k=1}^i C_o A$ = Summe der Produkte von Widerstandsbeiwerten mal der angeströmten Flächen von Komponente 1 bis i . (m^2)

Der Summand $\frac{1}{2} \rho v_E^2 \sum_{i=1}^n C_D A_i$ berücksichtigt die zusätzlichen Kräfte in den einzelnen Komponenten infolge der Anströmung beim Absinken. Je nach Körperform wird die umströmte Oberfläche unterschiedlich berechnet.

Für Stahlseil, Perlonseil und Kette gilt:

$$C_D A_2 = C_{DT} \cdot \pi \cdot D \cdot X_L$$

D = Durchmesser des Seils

X_L = Länge des Seils

Für zylindrische Instrumente:

$$C_D A = C_{DN} \cdot A_1 + C_{DT} \cdot A_2$$

mit $C_{DT} \cdot A_2 = C_D \cdot A_2$

$$C_{DN} \cdot A_1 = C_{DN} \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot D^2$$

A_1 = Grundfläche ; A_2 = Mantelfläche

Für kugelförmige Körper:

D = Durchmesser der Kugel

$$C_D A = C_{DT} \cdot \pi \cdot D^2$$

6.5 Das Unterprogramm KONS1:

Dieser Programmteil enthält alle wichtigen Konstanten und charakteristischen Werte für im Institut für Meereskunde Kiel verwendete Verankerungskomponenten.

Während des Programmlaufs werden die benötigten Werte eingelesen und verarbeitet. Eine Änderung dieser Werte im Unterprogramm ist ohne Eingriff ins Programm nicht möglich.

Allerdings können die Speicherplätze dieser Werte für bestimmte Programmläufe überschrieben werden, so daß ständige Änderungen einer zu berechnenden Verankerung möglich sind. Auskunft über die gespeicherten Komponenten gibt Tabelle 1.

Für jede Komponente werden angegeben

A(I) - Fläche pro m Länge

W(I) - Gewicht oder Auftrieb in Kp pro m Länge

zusätzlich für alle Seile und Ketten:

RBS(I) - rechnerische Bruchkraft in Kp sowie jeweils
4 Elastizitätskoeffizienten, die das Deh-
nungsverhalten beschreiben.

Für Stahlseil außerdem noch:

AW(I) - Metallische Querschnittsfläche in cm^2

Eingeteilt in 5 Gruppen je nach äußerer Form der Komponenten
sind außerdem noch die normalen und tangentialen Widerstands-
beiwerte gespeichert, sowie für alle Seilarten die Elastizi-
tätskoeffizienten.

Code No. 35 muß für den Auslöser reserviert werden, da dieser
Wert für die Berechnung des Restauftriebs als Marke dient.

Die Werte der einzelnen Komponenten wurden z.T. aus Her-
stellerangaben errechnet oder aus der Literatur 2., 11., 13.,
19., 21. entnommen.

Übersicht über die im Programm gespeicherten Verankerungs-
komponenten

Code No.	Bezeichnung	Gruppe
1	6 mm Stahlseil (Profilerseil)	Stahlseil
2	-	
3	10 mm Diepalon (8 mm Stahlkern)	
4	10 mm Diepalon + Thermistorkabel (50 m alt)	
5	-	
6	11 mm Perlonseil (Meteorleine)	Perlonseil
7	-	
8	-	
9	-	
10	-	
11	-	Nylonseil
12	-	
13	-	
14	-	
15	-	
16	11 mm Kevlar 29 Typ F/C	Parafilseil
17	-	
18	11 mm Kevlar + Thermistorkabel (400 m neu)	
19	11 mm Kevlar + Thermistorkabel (50 m neu)	
20	11 mm Kevlar + Thermistorkabel (50 m alt)	

Code No.	Bezeichnung	Gruppe
21	Metallisches Verbindungsstück SRS-R-SRS	Ketten
22	-	
23	16 mm Rundstahlkette DIN 82056	
24	-	
25	A-VACM	Zylinder- förmige Instrumente
26	A-RCM 4 bis 2000 m	
27	A-RCM 5 bis 6000 m	
28	Datalogger für Thermistorketten (neu)	
29	-	
30	-	
31	A-NM Neigungsmesser	
32	Datalogger für Thermistorketten (alt)	
33	Torpedo (Auftriebskörper)	
34	Oceano-Auslöser	
35	AMF-Auslöser	
36	Corning II	Kugelförmige Körper
37	Benthos II	
38	Auftriebskörper - (Käse)	
39	Benthos I (mit 0,75 m Kette)	
40	Kugel mit $d = 1 \text{ m}$	Auftrieb
41	Alpia 1	
42	Alpia V2A	

Tabelle 1 Bl. 2

6.6 Das Unterprogramm CALSI:

Es ist im Grunde das wesentliche Programm für die Berechnungen der einzelnen Kräfte, die auf jede Verankerungskomponente wirken. Zusätzlich dazu wird noch das Elastizitätsverhalten der verschiedenen Seilarten berechnet sowie die Ablenkungen der Segment- und Komponentstücke in bezug auf die Koordinatenrichtungen x (nach Osten), y (nach Norden) und z (als Vertikale).

6.6.1 Zum Dehnungsverhalten von synthetischen Seilen (Perlon, Nylon)

Die Problematik bei der Bestimmung des Perlonrecks sind die vielen Faktoren, die Berücksichtigung finden müssen. Leider sind sie nicht alle eindeutig angebbar, so daß auch bei sorgfältigem Vorgehen gewisse Unsicherheiten in der Vorhersagbarkeit des Dehnungsverhaltens bleiben. Grundsätzlich spielen eine Rolle:

- a) Vorabbelastung bei der Längenmessung
- b) Luftfeuchtigkeit
- c) Temperatur
- d) permanente und elastische Dehnung.

a) Vorabbelastung bei der Längenmessung:

Um die Länge eines synthetischen Seils genau zu bestimmen und sich ergebende Längenänderungen bei unterschiedlicher Belastung mit denen anderer Seile zu vergleichen, haben sich die amerikanischen Hersteller auf eine Vorabbelastung von $200 D^2$ geeinigt (Moller, Berteaux).

D.h. Ein neues Seil wird bei der Längenbestimmung mit einer Zugkraft von $F_Z = 200 D^2$ belastet.

Dabei ergibt sich F_Z = Zugkraft im Seil
in pounds

D = Durchmesser in inch
des Seils

Es ist also ein Eichmaß gegeben für den Vergleich von Seillängen. In Deutschland ist diese Absprache nicht gegeben, so daß unter verschiedener und für den Verwender unbekannter Belastung die Längenabmessung vorgenommen wird. Daraus ergeben sich erste Unsicherheiten in der Bestimmung des Recks von synthetischen Seilen.

b) und c) Bedeutung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur

Wichtig für eine gute Vorhersage des Recks wäre die Angabe des Herstellers über die vorhandene Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei der Längenabmessung. Da bei größerer Luftfeuchtigkeit und Temperatur das Seil eine größere Länge hat, können verschiedene Längen das Herstellerwerk unter der gleichen Bezeichnung verlassen. Würde man die Bedingungen, unter denen hergestellt wurde, kennen, wäre ein Vergleich von Seilen besser möglich.

d) Allgemeines über Dehnung von synthetischen Seilen:

Allgemein kann das Dehnungsverhalten durch die Darstellung mehrerer Hysteresisschleifen veranschaulicht werden (Berteaux, 1976), (Bretschneider, 1969). Dabei wird das Seil mehrmals bis zur Spannung σ_1 belastet, bis eine stabile Hysteresekurve erreicht ist.

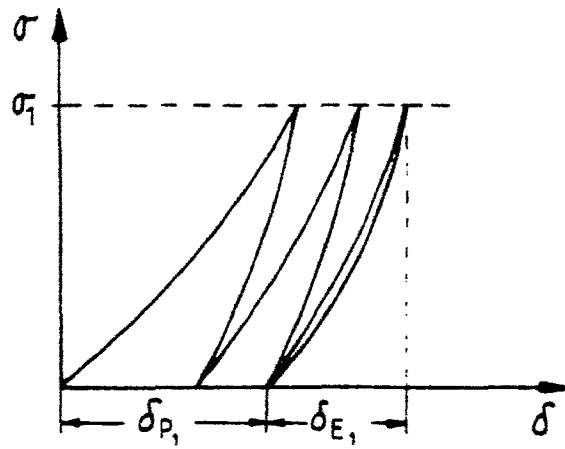


Bild 11

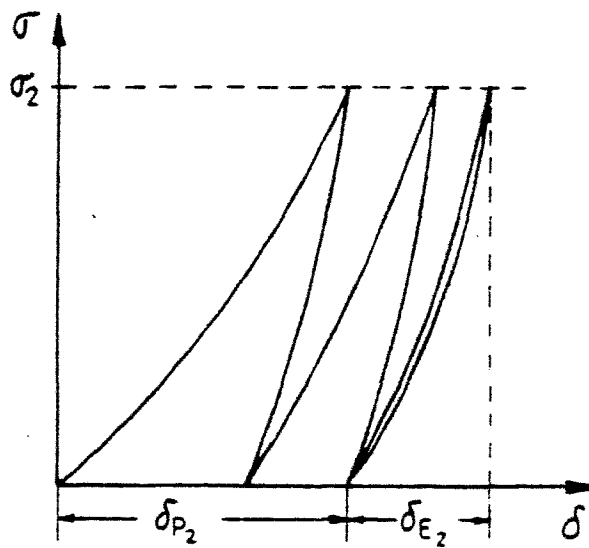


Bild 12

Wird die gleiche Seilart wiederum mehrmals bis zu einem anderen Spannungswert σ_2 belastet bis stabile Hysterese eintritt, so ergibt sich Bild 12.

Es bedeuten: δ = Dehnung

δ_{p1}, δ_{p2} = permanente Dehnungswerte

δ_{e1}, δ_{e2} = elastische Dehnungswerte

σ = Spannung

σ_1, σ_2 = Spannungswerte bis zu denen periodisch belastet wird

Man erhält von der gleichen Seilprobe unterschiedliche Werte für permanente und elastische Dehnungen, daraus läßt sich jetzt eine Kurve für permanente Dehnung in Abhängigkeit von der Spannung erstellen.

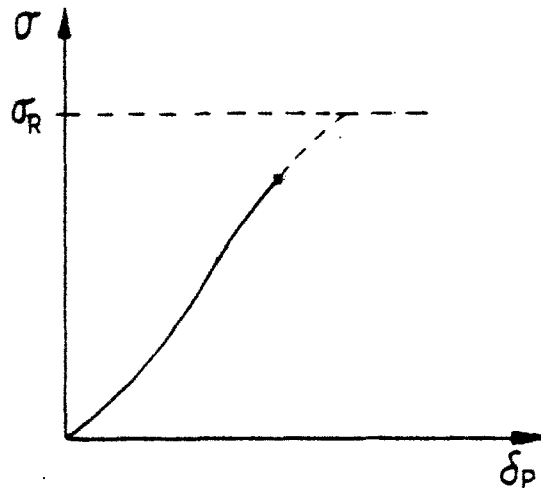


Bild 13

σ_R = Spannung, bei der das Seil reißt

δ_p = permanente Dehnung

Die Steigung der Achsen der stabilen Hysteresisschleifen aller Belastungskurven wird durch eine Funktion ausgedrückt, die das elastische Verhalten des Seils beschreibt.

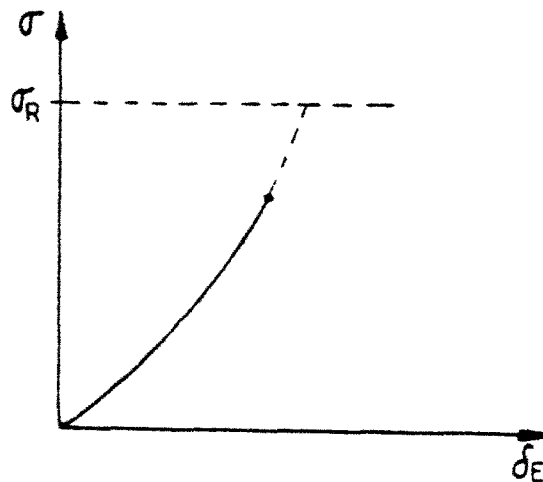


Bild 14

δ_e = elastische Dehnung

Die permanente Dehnung enthält die zurückbleibende Verformung durch vorangegangene Belastungen, d.h. in ihr geht die Spitzenbelastung beim Einbringen der Verankerung ein. "Es bleibt dann eine Restdehnung."

Die elastische Dehnung berücksichtigt die Längenänderung infolge momentarer Beanspruchungen der Verankerungsleine. Beide Dehnungen zusammen ergeben die Gesamtdehnung in Prozent der gemessenen Länge.

Ausgehend vom Hooke'schen Gesetz ^{x)} ist

$$\frac{F_z}{D^2} = a \cdot \left[\frac{L_G - L_0}{L_0} \right]^b$$

F_z = Zugkraft in Kp

a, b = Koeffizienten

D = Durchmesser in m

L_G = gedehnte Länge des Seils

L_0 = Ursprungslänge

damit ergibt sich für die Gesamtdehnung des Seiles:

$$\sigma_z = \left[\left(\frac{F_{zmax}}{D^2 \cdot a_p} \right)^{\frac{1}{b_p}} + \left(\frac{F_{zm}}{D^2 \cdot a_e} \right)^{\frac{1}{b_e}} \right] \cdot 100$$

Es sind: σ_z = totale Dehnung in Prozent

F_{zmax} = maximale Zugkraft in (Kp)

F_{zm} = momentare Zugkraft in (Kp)

D = Durchmesser in m

a_e, b_e = Koeffizienten für elastische Dehnung

a_p, b_p = Koeffizienten für permanente Dehnung

b_i = dimensionslos ; a_i = (Kp/m²)

^{x)} Hooke'sches Gesetz:

Die Spannungen σ sind den Dehnungen ϵ proportional. Die Proportionalitätskonstante heißt Elastizitätsmodul E . ($E = \frac{1}{\alpha}$ mit α = Dehnzahl). Dieses Gesetz gilt bis zur Proportionalitätsgrenze σ_p . Darüber hinaus wird gewöhnlich ein Potenzgesetz zugrunde gelegt.

Die Koeffizienten a_e und a_p sowie die Kehrwerte der Koeffizienten b_e und b_p , also $\frac{1}{b_e}$ und $\frac{1}{b_p}$, können im Unterprogramm KONSI als Vierersatz für jeden Seiltyp gespeichert werden.

Im Institut für Meereskunde in Kiel wurden im Laufe der Zeit zweimal Dehnungsversuche an Perlonseilen durchgeführt. Engelmann (1972), Zenk (1981). Im ersten Fall betrug die Länge 3 m inclusive zweier fünffach abgebundener Kauschen. Da die Kauschen einen großen Teil der Seillänge einnehmen und nicht bekannt ist, wie die Kraft durch die Kauschen auf das Seil wirkt (Verformung der Kauschen etc.) und außerdem trockenes Perlonseil Verwendung fand, wurden 1981 neue Reckversuche unternommen. Ein 100 m langes Perlonseil wurde im durchnässten Zustand über zwei Umlenkrollen mittels einer Schiffswinde gereckt. Hier nimmt eine Rolle, zwischen Zugmesser und abzumessender Strecke gelegen, einen geringen Anteil der Zugkraft auf. Durch die Schiffsbewegungen kann andererseits der Zug auf das Seil nicht konstant gehalten werden, so daß auch diese Dehnungsmessungen mit Fehlern behaftet sind. Beide Meßreihen wurden durch Exponentialkurven approximiert, die oberhalb von 200 Kp gute Werte liefern.

Es gilt für die Zenk'sche Kurve:

$$F_z = 56.11 \cdot e^{0.243 \cdot \delta_z}$$

aufgelöst nach δ_z ergibt sich

$$\delta_z = \frac{1}{0.243} \cdot (\ln F_z - \ln 56.11)$$

Für die Kurve nach Engelmann ergibt sich:

$$F_z = 40.72 \cdot e^{0.25 \cdot \delta_z}$$

nach δ_z aufgelöst:

$$\delta_z = \frac{1}{0.25} \cdot (\ln F_z - \ln 40.72)$$

δ_z = Gesamtdehnung in (Prozent)

F_z = Zugkraft in (Kp)

6.6.2 Zum Dehnungsverhalten von Stahlseil:

Das Dehnverhalten von Stahlseil kann unterteilt werden

in a) bleibende Formänderungen (Strukturänderung)

und b) elastische Formänderungen

a) bleibende Längenänderungen ermittelt man durch

$$\delta_b = \frac{F_z}{F_R} \cdot C_b \cdot 100$$

δ_b = bleibende Dehnung (%)

F_z = wirkende Kraft in (Kp)

F_R = rechnerische Bruchkraft (Kp)

C_b = Koeffizient für strukturelle Dehnung

b) Die elastische Dehnung wird gegeben durch das Hooke'sche Gesetz, so daß gilt:

$$\delta_e = \frac{\sigma}{E}$$

σ = Spannung

E = Elastizitätsmodul

und
$$\sigma = \frac{F_z}{A_m}$$

F_z = wirkende Kraft (Kp)

A_m = metallische Querschnittsfläche (cm²)

$$\delta_e = \frac{F_z}{A_m \cdot E}$$

Die Gesamtdehnung ist dann

$$\sigma_z = \left(\frac{F_z}{F_R} \cdot c_b + \frac{F_z}{A_m \cdot E} \right) \cdot 100$$

Es wird dabei angenommen, daß bei einer Belastung von 70% der rechnerischen Bruchkraft (Elastizitätsgrenze) die strukturelle Dehnung 1 % beträgt, und diese linear auf Null abnimmt bei der Belastung Null.

Damit ergibt sich für den Koeffizienten c_b

$$c_b = \frac{0.01}{0.7} = 1.43 \cdot 10^{-2}$$

Der Elastizitätsmodul für Diepalonseil beträgt

$$E = 1.44 \cdot 10^6 \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

Beide Werte sind im Unterprogramm KONSI gespeichert.

6.6.3 Das Dehnungsverhalten von Kevlar:

Da keine Reckversuche von Parafilseilen vorhanden sind, wird das Dehnungsverhalten von Kevlar über die Formel für Stahlseil berechnet, was eine gute Übereinstimmung mit bekannten Werten bringt. Für die metallische Querschnittsfläche wird die Querschnittsfläche des Seils eingesetzt (m^2). Nach Angaben der Vertriebsfirma (Börnhöft) hat Kevlar bei 70 % der rechnerischen Bruchkraft eine Dehnung von 1,85 %, die fast linear bis Null abnimmt bei Nullast.

Der Koeffizient c_b ergibt sich damit zu

$$c_b = \frac{0.0185}{0.7} = 2.64 \cdot 10^{-2}$$

Der Elastizitätsmodul für Kevlar beträgt

$$E = 7.93 \cdot 10^5 \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

Beide Werte sind im Unterprogramm KONS1 gespeichert.

6.6.4 Berechnung der Abweichungen vom Anker für jede Komponente:

Nachdem die gedehnten Längen der Seile ermittelt sind, können die Abweichungen von der Ankerposition für jedes Segment oder jede Komponente in allen Koordinatenrichtungen bestimmt werden. Wie in Zeichnung 15 dargestellt, ergeben sich dann für die x-Ablenkung XEXC:

$$XEXC = STRL \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi$$

θ = Winkel von der Vertikalen des Segmentes

φ = Azimuthwinkel des Segmentes

STRL = gedehnte Länge des Segmentes

für die y-Ablenkung YEXC:

$$YEXC = STRL \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$$

sowie für die vertikale Höhe VHT:

$$VHT = STRL \cdot \cos \theta$$

6.7 Das Hilfsprogramm CURVE (current velocity):

Um Verankerungen auch mit vereinfachten Stromprofilen schnell rechnen zu können, wurde zur besseren Erstellung von Stromprofildateien das Programm CURVE geschrieben. Es berechnet für drei verschiedene, frei wählbare Stromprofile maximal 20 Tiefenpunkte mit Stromgeschwindigkeit und Richtung. Diese Daten können direkt als Eingangswerte für das Programm STASIP benutzt werden.

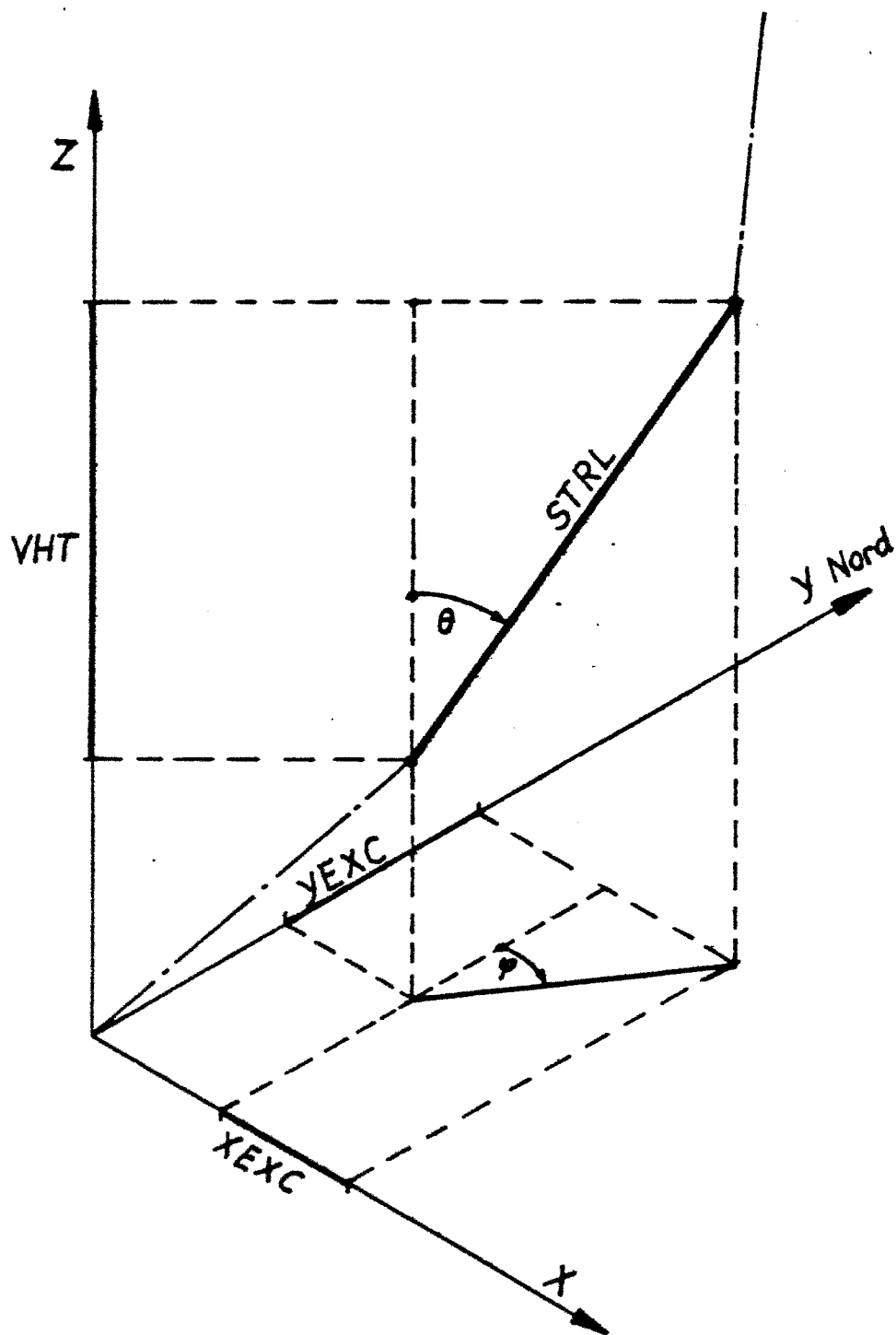


Bild 15

Abweichungen der Komponenten vom Anker

Bei den drei zur Verfügung stehenden Stromprofilen handelt es sich um zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder mit horizontalen Geschwindigkeiten. Alle haben die größten Stromgeschwindigkeiten an der Oberfläche und benutzen eine variable Oberflächenschicht mit konstanter Geschwindigkeit. (Berteaux et al., 1972).

Stromprofil 1:

Es beschreibt einen monotonen Abfall der Geschwindigkeit mit der Tiefe. Die beschreibende Gleichung ist:

$$U(z) = V \cdot H_0^\alpha \cdot Z^{-\alpha}$$

Dabei sind

$U(z)$ = Geschwindigkeit in der Tiefe Z in (m/s)

V = Oberflächengeschwindigkeit in (m/s)

H_0 = Tiefe der Oberflächenschicht mit konstanter Geschwindigkeit in m

α = frei wählbare Konstante

Z = beliebiger Tiefenpunkt in m an dem $U(z)$ berechnet werden soll.

Stromprofil 2:

Die Geschwindigkeit nimmt monoton bis Null ab in einer festgelegten Tiefe. Danach kehrt sich die Strömungsrichtung um und die Geschwindigkeit nimmt bis zum Boden wieder zu. Es gilt die Beziehung

$$U(z) = V - V \cdot \left[\frac{Z - H_0}{\beta \cdot DPT - H_0} \right]^\alpha$$

mit β = frei wählbare Konstante

DPT = Wassertiefe in (m)

d.h. $\beta \cdot DPT$ = Tiefenpunkt an dem $U(z) = 0$ ist.

Stromprofil 3:

Die Stromgeschwindigkeit verändert sich hier parabelförmig. Nach einer Tiefe H_0 nimmt der Strom ab bis zu einem Minimalwert. Von dort steigen bis zum Boden hin die Geschwindigkeiten wieder an. Hat im Minimum die Strömung einen negativen Wert, so wechselt der Strom die Richtung zweimal innerhalb der Wassersäule.

Beschrieben wird dieses Profil durch

$$U(z) = \alpha + (V - \alpha) \cdot \left[\frac{z - \beta - DPT}{H_0 - \beta - DPT} \right]^2$$

α = Größe der Stromgeschwindigkeit im Strömungsminimum

β = Abstand des Strömungsminimums vom Boden in (m)

Das Programm CURVE ist ein Dialogprogramm, welches die benötigten Werte vom Benutzer abfragt und daraus dann die Stromgeschwindigkeit berechnet. Man erhält auf dem Bildschirm zur Kontrolle den errechneten Wert angegeben. Nach der Eingabe von maximal 20 Tiefenpunkten bricht das Programm ab und speichert die Werte unter einem zu Beginn einzugebenden Filenamen. Gleichzeitig erhält der Benutzer ein schriftliches Protokoll über den Schnelldrucker.

6.8 Das Hilfsprogramm DBARM:

Zur Überprüfung des Programms STASIP wurde dieses mit Meßdaten von verschiedenen Verankerungen verglichen. Über Druckregistrierungen kann man die Tiefenlage verschiedener Instrumente mit den im Programm errechneten Tiefen vergleichen. Das Programm DBARM ermöglicht nun die schnelle Umrechnung von Tiefenangaben in dbar in Tiefenmeter durch Eingabe der

$\sigma_{s,T,P}$ - Werte in diesen Tiefen.

Aus dem gemessenen hydrostatischen Druck P in (dbar) erhält man die Tiefe in (m) über die hydrostatische Grundgleichung, falls die mittlere Dichte ρ in (Kg/m^3) der Wassersäule bekannt ist.

$$Z = \frac{P}{\rho \cdot g} \cdot 10^4$$

Zur Vereinfachung wurde als mittlere Größe für die Dichte der aus der Temperatur und dem Salzgehalt errechnete Wert für $\sigma_{s,T,P}$ genommen.

$$\sigma_{s,T,P} = (\rho_{s,T,P} - 1000.0)$$

Die Erdbeschleunigung g wird einheitlich mit $g = 9,81 \text{ m}/\text{sec}^2$ angenommen.

Die durch diese Vereinfachungen entstehenden Fehler in der Tiefenbestimmung der Instrumente sind gegenüber den anderen auftretenden Ungenauigkeiten vernachlässigbar klein.

7. Anwendung des Programms STASIP

Zur Überprüfung der Genauigkeit des Programms und als Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten, für die im Institut für Meereskunde Kiel eingesetzten Einpunktverankerungen, wurden fünf Verankerungen unterschiedlicher Konstruktion berechnet. Angewendet wurden dabei

- a) Verhalten der Verankerung im strömungslosen Zustand
- b) Veränderung der Verankerungsanordnung durch vereinfachte Stromprofile
- c) Verhalten der Verankerung bei gemittelten aktuellen Stromprofilen
- d) Vergleich der gemessenen Druckdaten mit den im Programm errechneten Instrumententiefen sowie Gegenüberstellung der gemessenen zur errechneten Seilneigung

8. Übersicht über die verwendeten Verankerungen:

1) Verankerung J 226:

Einsatzgebiet war der Nordostatlantik nördlich der Anton Dohrn Kuppe im Jahre 1978 während des JASIN-Experiments. Die genaue Position war $12^{\circ}30'$ S $58^{\circ}59,8'$ W. Als Übersicht dient Bild 16. Es handelt sich um eine Verankerung in 1577 m Wassertiefe, die ausschließlich aus Stahlseil (10 mm Diepalon) bestand und während JASIN die Bezeichnung K1 trug. Sie enthielt 8 Strommesser sowie 9 Auftriebspakete. Die Tiefe der Meßinstrumente ist in Bild 17 abzulesen. Das oberste Auftriebselement befand sich in ≈ 80 m Tiefe und war mit einer Oberflächenmarkierung aus 3 Fischerkugeln durch ein 100 m langes Perlonseil verbunden. Der Meßzeitraum der Verankerung betrug 28 Tage und dauerte vom 10. August 1978 bis zum 7. September 1978.

2) Verankerung N 184:

Diese Verankerung wurde 1977 im Kanarenbecken westlich Madeira in 5260 m Wassertiefe im Rahmen des NEADS-Experiments eingesetzt. Es handelte sich wie die folgenden Verankerungen um eine Langzeitmessung über den Zeitraum von etwa einem Jahr. Die genaue Position war 33° N 22° W (siehe Bild 18). (Müller, 1981). N 184 bestand aus Stahlseil bis 1500 m Tiefe und Perlonseil (11 mm) bis zum Boden und enthielt 4 Meßinstrumente sowie 10 Auftriebspakete. Die genaue Anordnung gibt Bild 19 wieder. Der Meßzeitraum erstreckte sich vom 15. Januar 1977 bis Ende Oktober 1977. Die oberste Verankerungskomponente befand sich in etwa 580 m Tiefe.

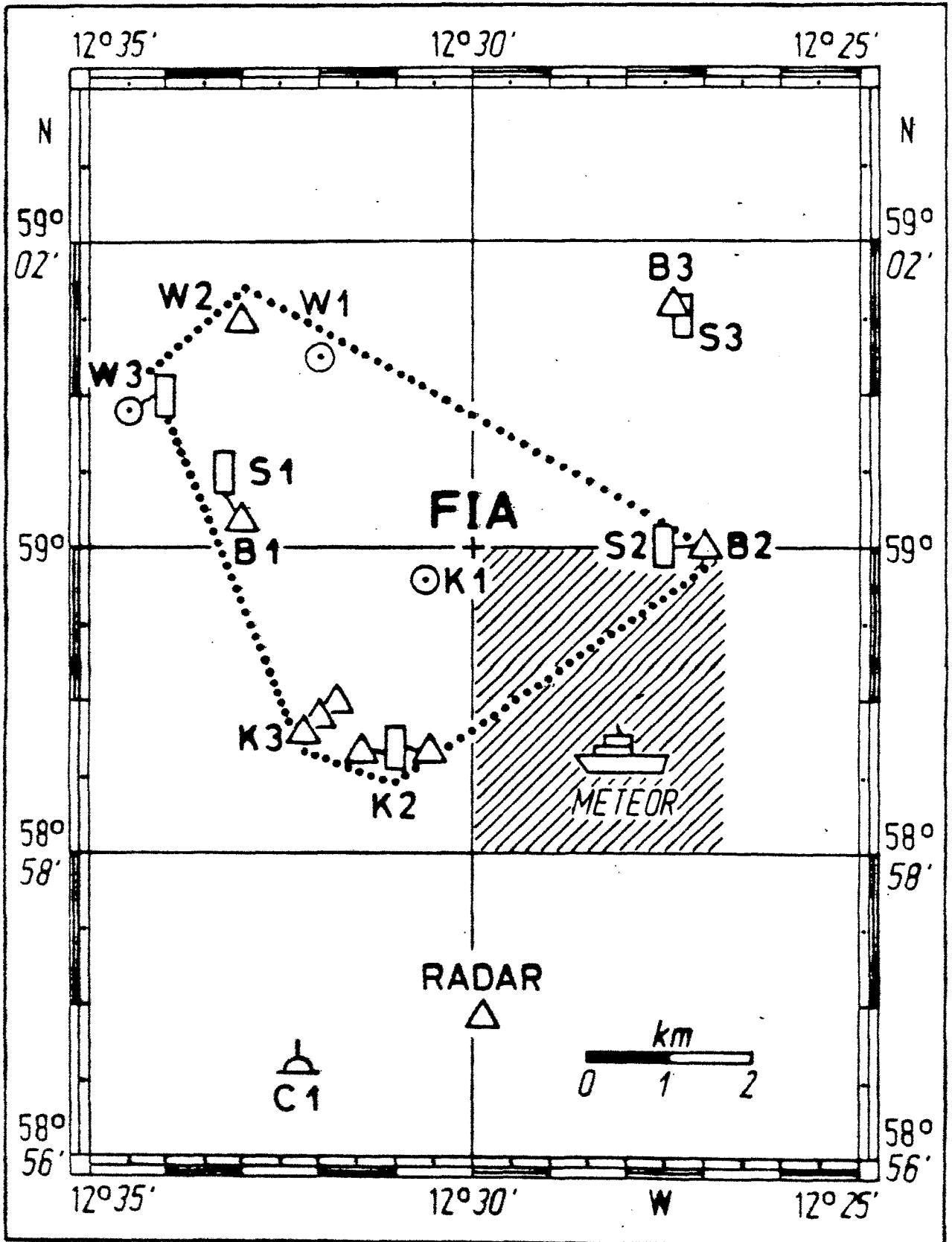


Bild 16

Übersicht über das JASIN-Gebiet

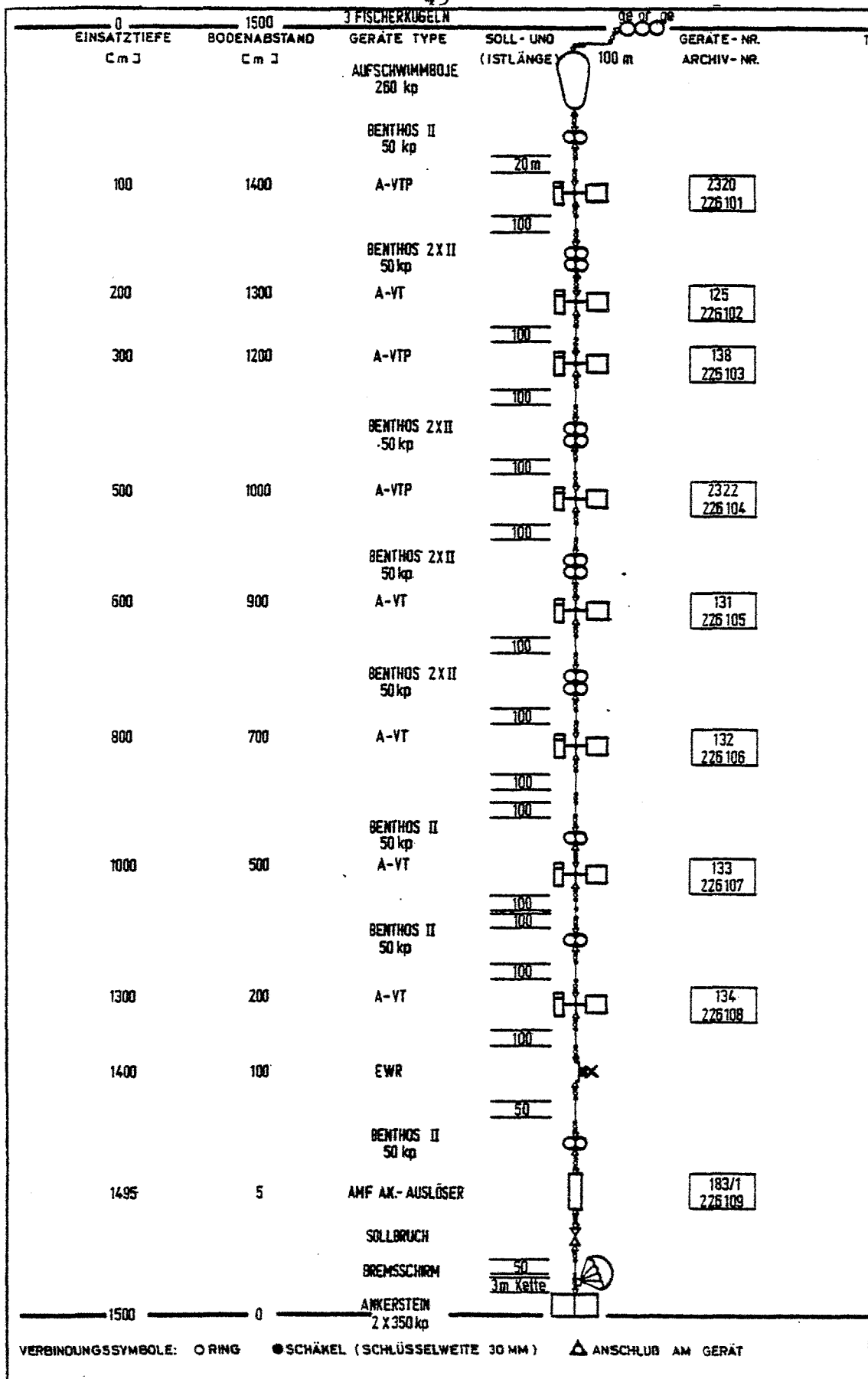


Bild 17: Verankerung J 226

3) Verankerung N 230:

Ebenfalls im Rahmen von NEADS eingesetzte Verankerung westlich von Portugal im Iberischen Becken auf 5300 m Tiefe. Die genaue Position betrug $40^{\circ}31' W$ $17^{\circ}19' W$ (siehe Bild 18). Die Meßdauer umfaßte 248 Tage vom 18. Mai 1978 bis zum 12. Januar 1979. Auch N 230 war aus Stahlseil und Perlonseil kombiniert und bestand aus 4 Strömungsmessern und 11 Auftriebskörpern. Die genaue Verankerungszeichnung liefert Bild 20. Das oberste Element lag in etwa 600 m Tiefe.

4) Verankerung N 264

Hierbei handelte es sich um den Nachfolger von N 184, der im Jahre 1980 mit 8 Meßinstrumenten auf gleicher Position über einen Zeitraum von 180 Tagen Daten lieferte.

Verankerung N 264 war auch eine Stahlseil- und Perlonseil-Kombination, deren oberster Auftriebskörper allerdings nur ungefähr 100 m unter der Wasseroberfläche war (siehe Bild 21). Wie sich später herausstellte, waren die einzelnen Seillängen durch ein defektes Meterrad abgemessen, so daß kein Vergleich mit dem Rechenprogramm möglich war. Allerdings wurden die Zugkräfte im Seil sowie die Restauftriebe der einzelnen Komponenten für den strömungslosen Fall mituntersucht.

5) Verankerung N 276-1:

Diese Verankerung enthält in den obersten 1500 m Kevlar-seile von 11 mm Durchmesser statt des sonst üblichen Stahl-

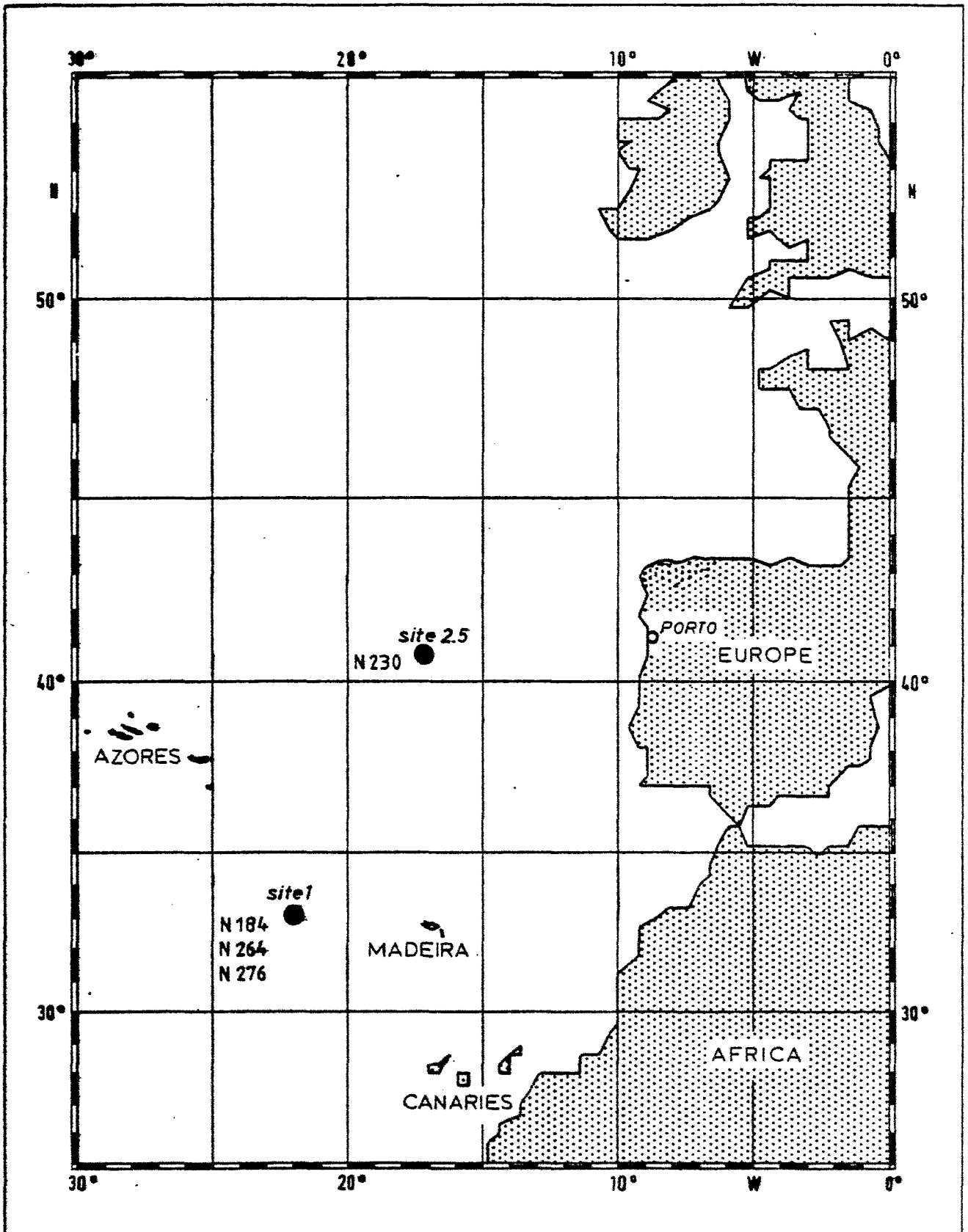


Bild 18

Übersicht über das NEADS-Gebiet

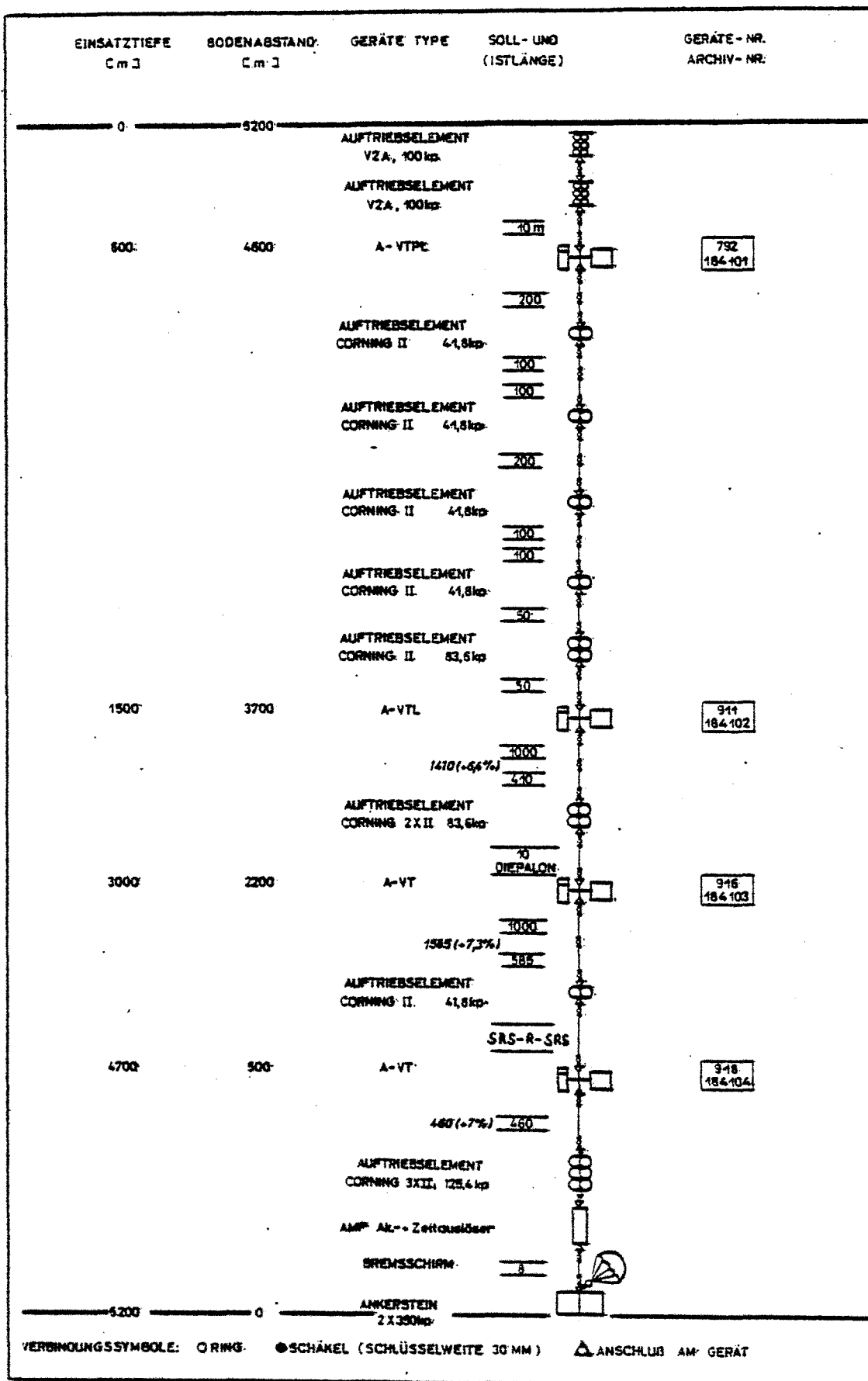


Bild 19: Verankerung N 184

seils. Unterhalb von 1500 m wurde auch hier Perlonseil verwendet. Durch Versagen des Auslösers konnte sie nicht wie üblich an ihrer Position 33°N $21\ 51\ \text{W}$ aufgeschwommen werden, sondern mußte mit dem Schleppgeschirr gesucht werden. Dabei wurden Zweidrittel der Verankerung geborgen. Ein Jahr später wurde bei nochmaligem Suchen ein weiterer Strommesser geborgen. Die Verankerung enthielt 15 Instrumente, darunter zwei Neigungsmesser. Bild 22 zeigt die Tiefenlage und die Anordnung der Instrumente. Der Sender befand sich in einer Tiefe von etwa 100 m und die Neigungsmesser waren in 200 und 700 m Wassertiefe angeordnet. Beim ersten Schleppversuch im Herbst 1981 konnten die Geräte 102 bis 110 geborgen werden. Sie enthielten Daten vom Dezember 1980 bis September 1981. Im März 1982 wurde dann noch Gerät 111 gefunden, das bis zu diesem Zeitpunkt noch Daten aufgezeichnet hatte.

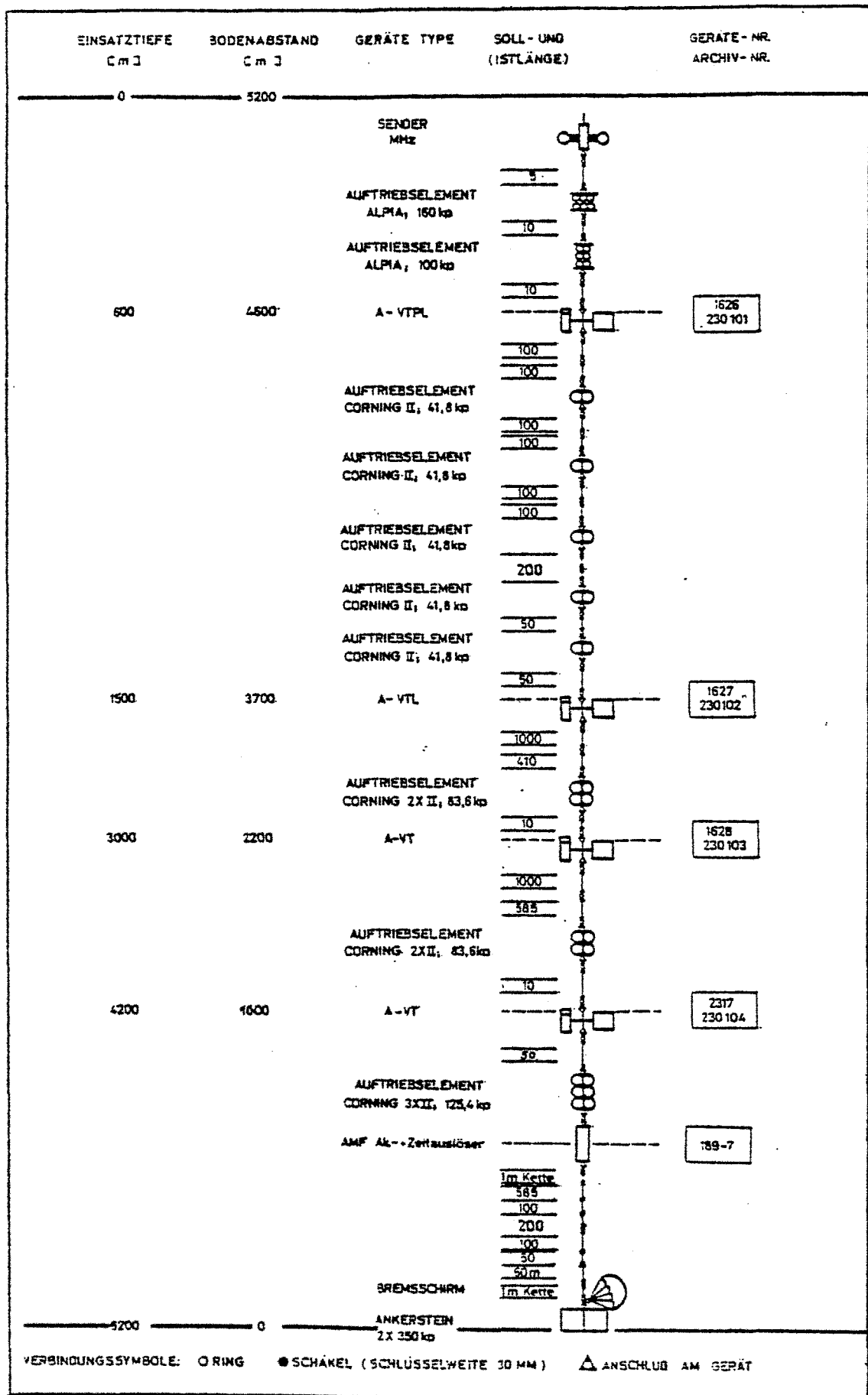


Bild 20: Verankerung N 230

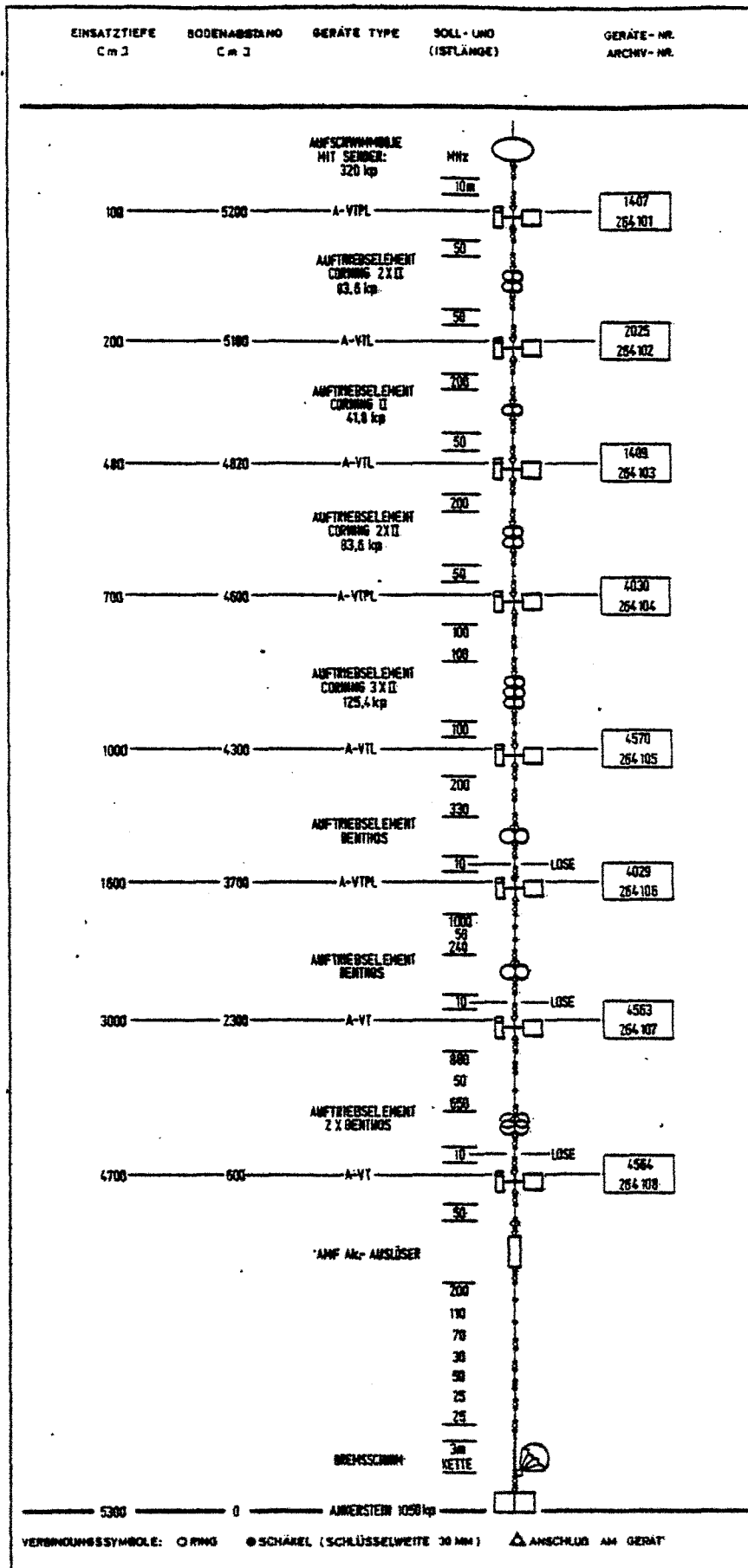


Bild 21: Verankerung N 264

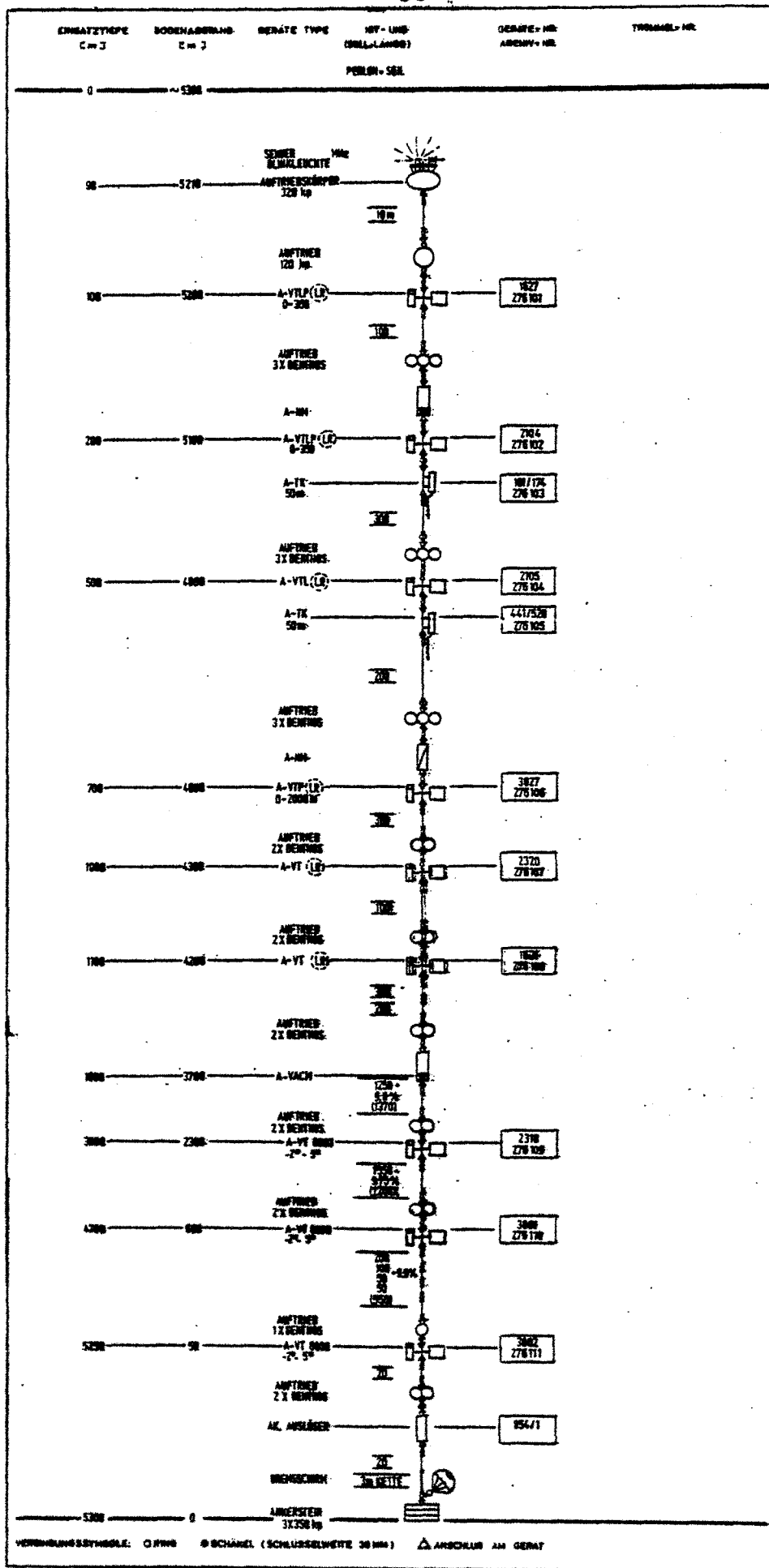


Bild 22: Verankerung N 276-1

9. Auswertung der Verankerungen im strömungslosen Zustand

Wichtige Hinweise über das Verhalten beim Einsatz sowie über die Tiefenlage der Instrumente bieten bereits erste Analysen der Verankerung im strömungslosen Zustand. Außer dem schriftlichen Protokoll, welches sofort die Instrumententiefen anzeigt, sind besonders zwei Diagramme für weitergehende Interpretationen nützlich.

Diagramm 1: Es stellt die Zugkraft im Seil in (Kp) über die Tiefe in (m) aufgetragen dar.

Diagramm 2: Es zeigt den Restauftrieb in (Kp) der Verankerungskomponenten aufgetragen über die Tiefe in (m) dar.

Aus den Protokollen jeder Verankerung wurden nun die Instrumententiefen tabellarisch erfaßt sowie beide Diagramme gezeichnet und ausgewertet. Zur besseren Übersicht werden die Verankerungen nacheinander besprochen.

9.1 Einige Grundlagen:

Um einen richtigen Eindruck zu bekommen und die beiden Diagramme richtig zu verstehen, sollen zunächst einige einführende Bemerkungen gemacht werden.

Nimmt man eine stark vereinfachte Verankerung, die nur aus einem Auftriebskörper und dem Seil besteht, so erhält man folgende Verteilung der Zugkraft (bei gleichmäßiger Verteilung des Seilgewichts)

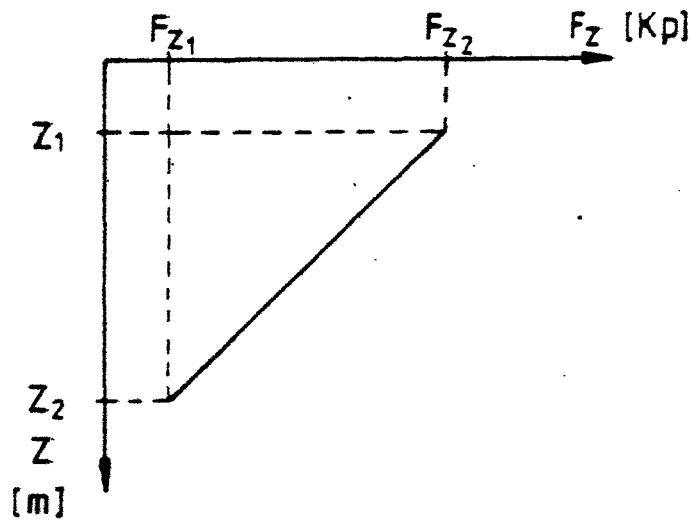


Bild 23

Dabei ergibt der Wert F_{Z1} die Kraft, mit der die Verankerung am Anker zieht und F_{Z2} die Zugkraft in der obersten Komponente. Die Kurve für den Restauftrieb ergibt dann mit $R_1 =$ Restauftrieb der obersten Komponente

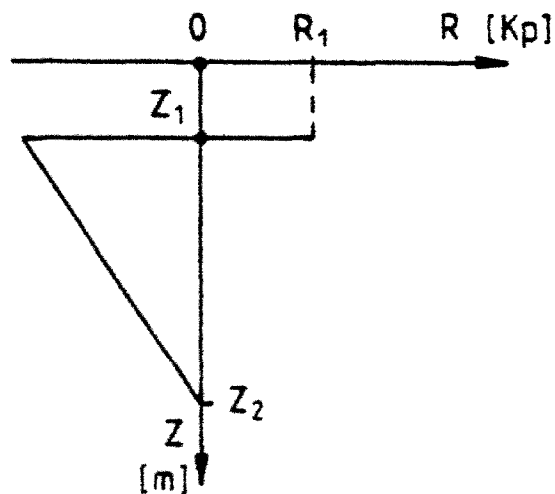


Bild 24

Diese Einfach-Verankerung hat ihren gesamten Auftrieb am obersten Punkt. Diese Auftriebsverteilung ist gut für eine Verankerung, die möglichst steif sein soll. Sie hat aber zwei wesentliche Nachteile.

- 1) Reißt der Auftriebskörper durch eine Beschädigung ab, so hat die Restverankerung nur negativen Auftrieb und sinkt zu Boden. Die Verankerung wäre verloren.
- 2) Je größer der Auftrieb am obersten Punkt ist, um so größer ist die Anströmfläche der Verankerung in der oberflächennahen Schicht. Damit werden die Widerstandskräfte, die das Seil zu neigen versuchen, größer. Verteilt man nun den Auftrieb in dieser vereinfachten Verankerung nur nach dem Gesichtspunkt der Sicherheit, so müssen zusätzlich Auftriebskörper in der Tiefe angebracht werden, wenn die Zugkraft im oberen Teil erhalten werden soll. Für die Zugkraft ergibt sich dann eine Lage im schraffierten Bereich.

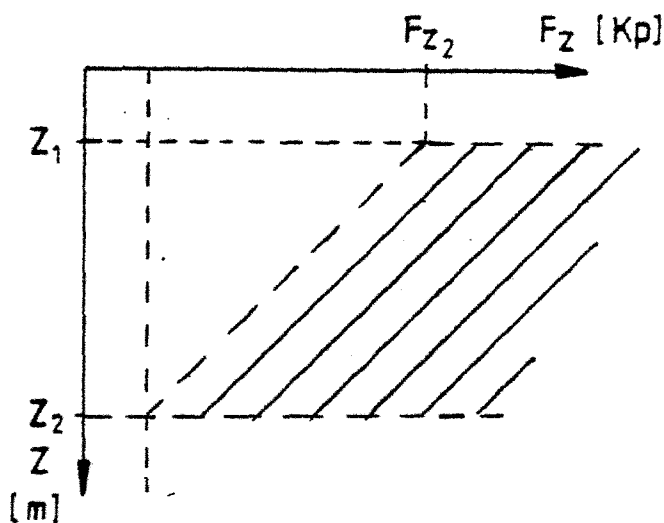


Bild 25

Der Restauftrieb für diese Verankerung ist dann mit seiner Achse vollständig im positiven Bereich. Aber auch hier ergeben sich Nachteile.

- 1) In jedem Fall erhöht sich durch zusätzliche Auftriebskörper die Zugkraft auf den Anker bei gleichbleibenden Gewichten im Seil. Das Nettogewicht des Ankers kann dadurch für starke Stromlagen zu klein werden, um den Anker auf Position zu halten.
- 2) Die Zugkraft im Seil wird zu groß. Damit wird das Risiko an Schwachstellen erhöht. Aus den Kurven für die Zugkraft sieht man, daß Schwachstellen vor allen Dingen über und unter den Auftriebskörpern zu erwarten sind.
- 3) Durch den zusätzlichen Auftrieb werden mehr Auftriebskörper benötigt. So wird die Verankerung immer teurer.

In der Praxis wird es also nötig sein, einen Mittelweg zwischen diesen beiden Extremfällen zu beschreiten. Dies bedeutet, Verankerungen zu konzipieren, die sowohl sicher als auch stabil bei Anströmung sind und dabei ein Minimum an Material erfordern.

Im Hinblick auf diese Gegebenheiten sollen jetzt die dieser Arbeit zugrundeliegenden Verankerungen untersucht werden.

9.2 Verankerung J 226

Eine Auflistung der wichtigsten Tiefen dieser Verankerung gibt Tabelle 2. Sie dienen später zum Vergleich der Abtauchstrecken zwischen den Meßdaten und den gerechneten

Werten. Außerdem sind diese Tiefen wichtig für die Erstellung der Stromprofile, um die gemessenen Ströme in den richtigen Tiefen einzugeben. Diese Verankerung besitzt zwei Drucksensoren in etwa 70 und 580 m, die einen Vergleich der Tiefenlagen ermöglichen.

Die Zugkraft im Seil schwankt zwischen 220 Kp und 410 Kp. Dabei fällt auf, daß im mittleren Bereich der Verankerung in 600 - 1000 m Tiefe die Zugkraft ihr breites Maximum hat (Bild 26) und bis zur Ankertiefe abnimmt. Die Zugkraft am Anker beträgt 226,8 Kp, was bei 700 Kp Ankergewicht klein genug ist. Betrachtet man in Bild 27 die Darstellung für den Restauftrieb, so erkennt man, daß zwischen Auslöser und oberster Komponente die Kurve genau spiegelbildlich zur Zugkraftkurve verläuft. Das ist auf Grund gleicher Berechnungsart mit allerdings unterschiedlichem Ausgangspunkt nicht verwunderlich. Die Lage des Nullpunkts für den Restauftrieb ist aus der Zugkraftkurve nicht ablesbar, wodurch eine getrennte Berechnung gerechtfertigt ist.

Bei der Verankerung J 226 erkennt man also, daß nur direkt über dem Auslöser und in den ersten 400 Metern positiver Restauftrieb vorhanden ist. Im mittleren Bereich dagegen befinden sich die Komponenten im Bereich negativen Restauftriebs bis maximal -134,7 Kp. Die oberste Komponente hat einen positiven Wert von 274,6 Kp.

Berechnete Instrumententiefen

Komp.Nr.	Tiefe (m)	Art
1	44,8	oberster Auftrieb
4	67,3	A-VTP
8	170,7	A-VT
10	272,7	A-VT
15	476,5	A-VTP
19	579,9	A-VT
24	783,9	A-VT
28	987,0	A-VT
33	1290,7	A-VT
37	1444,0	Auslöser
	1577,0	Boden

A-V	Aanderaa-Strommesser	
A-VT	"	mit Temperaturmessung
A-VTP	"	mit Temperatur- und Druckmessung

Tabelle 2

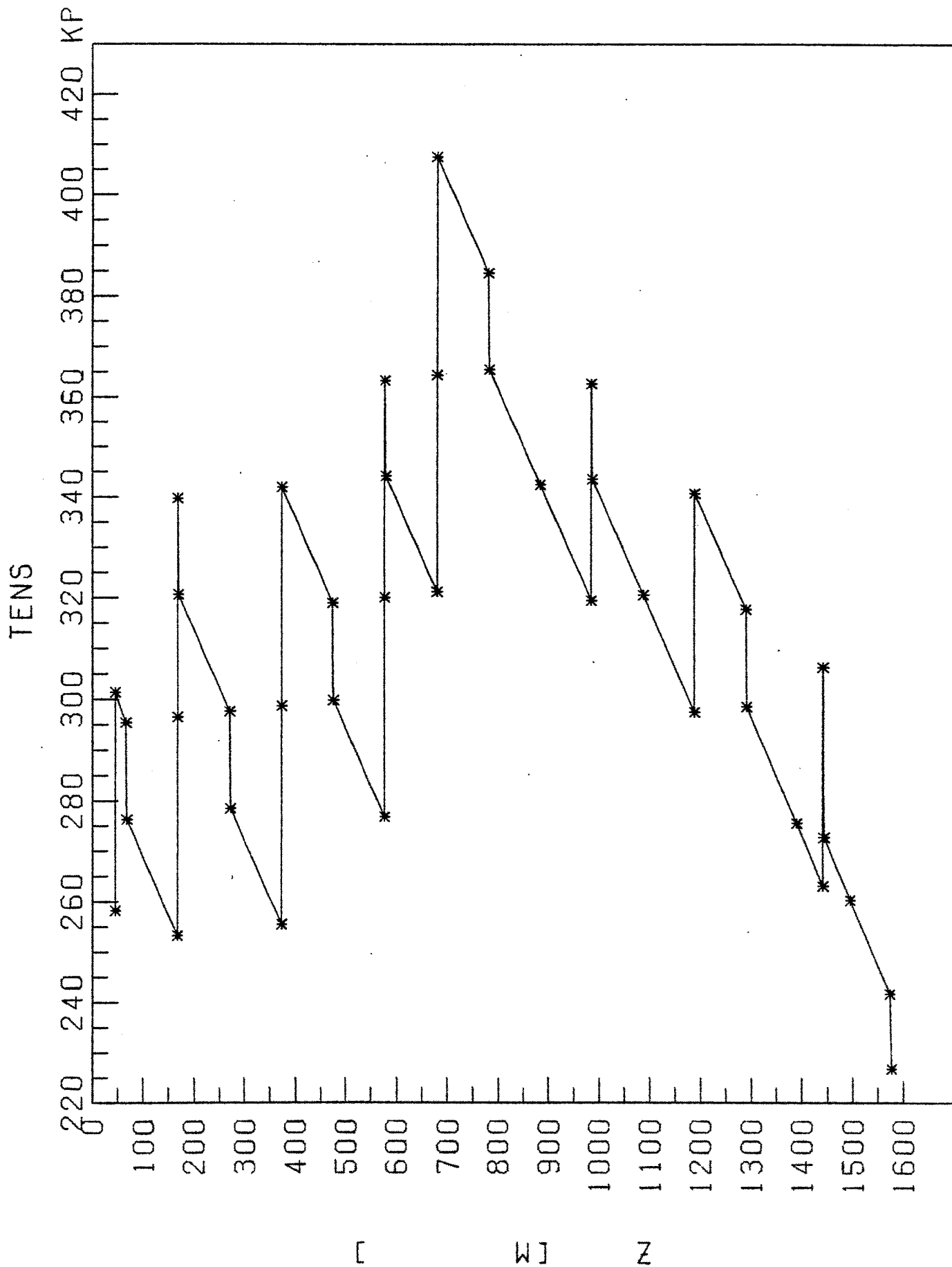


Bild 26: Zugkraft im Seil über
die Tiefe für J 226

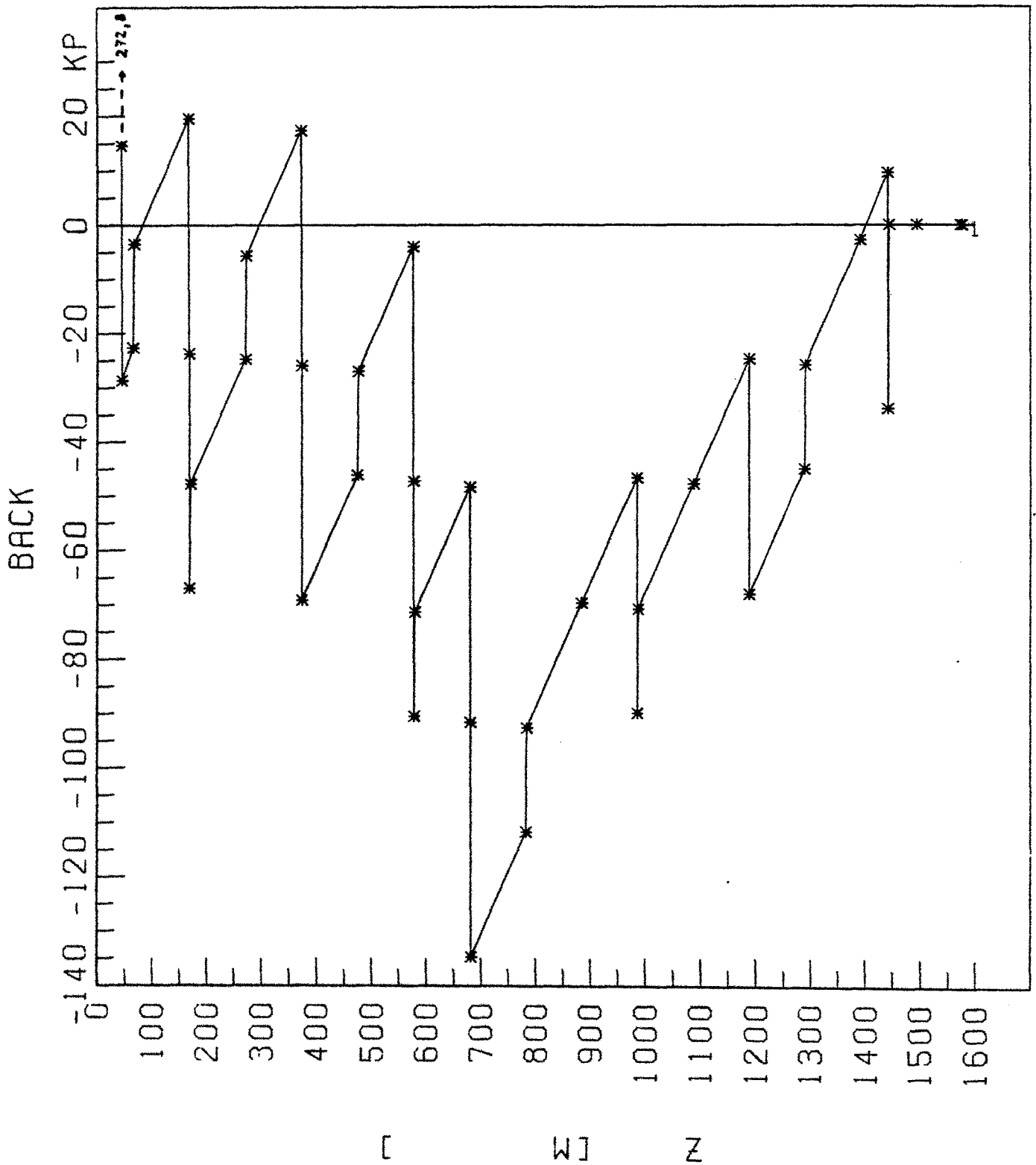


Bild 27: Restauftrieb über die Tiefe für J 226

9.3 Vorbemerkungen zu den NEADS-Verankerungen

Im Gegensatz zur reinen Stahlverankerung J 226 bestehen die folgenden Verankerungen in den tieferen Komponenten aus dem sehr dehnbaren Material Perlon. Damit kommt der Reckberechnung von Perlonseil eine besondere Bedeutung zu. Wie bereits beschrieben, gibt es zwei unterschiedliche Untersuchungen des Perlonrecks, die beide durch exponentielle Kurven angenähert wurden. Da beide Methoden die Vorreckung infolge einer großen Belastung, z.B. beim Absenken der Verankerung, nicht berücksichtigen, fehlt ein wesentlicher Teil in der Berechnung des Perlonrecks. Dieser Summand in der Längenbestimmung ist nur durch Lastversuche am Seil zu ermitteln und wird deshalb bei den folgenden Betrachtungen als Fehler eingehen. Er hat eine Größenordnung von etwa 1 bis 1,5 % der Perlonlänge. Um zu entscheiden, welche Reckberechnung außer diesem grundsätzlichen Fehler die besseren Werte für die Verankerungslängen liefert, werden beide Berechnungsarten durchgeführt und in ein Diagramm gezeichnet. In der Besprechung der einzelnen Verankerungen sieht man die Kurven für die Zugkraft im Seil über die Tiefe aufgetragen für beide Reckuntersuchungen. Es ist zu erkennen, daß zwischen der Zenk'schen Methode (im folgenden Methode A genannt) und der Engelmann'schen Methode (im folgenden Methode B genannt) ein Tiefenunterschied von etwa 40 m in den obersten 1500 m bei allen Verankerungen besteht. Diese Differenz nimmt erwartungsgemäß vom Boden her mit wachsender Perlonlänge zu und bleibt oberhalb von 1500 m im Stahlseilbereich konstant. Dieser Differenzwert ist auch aus

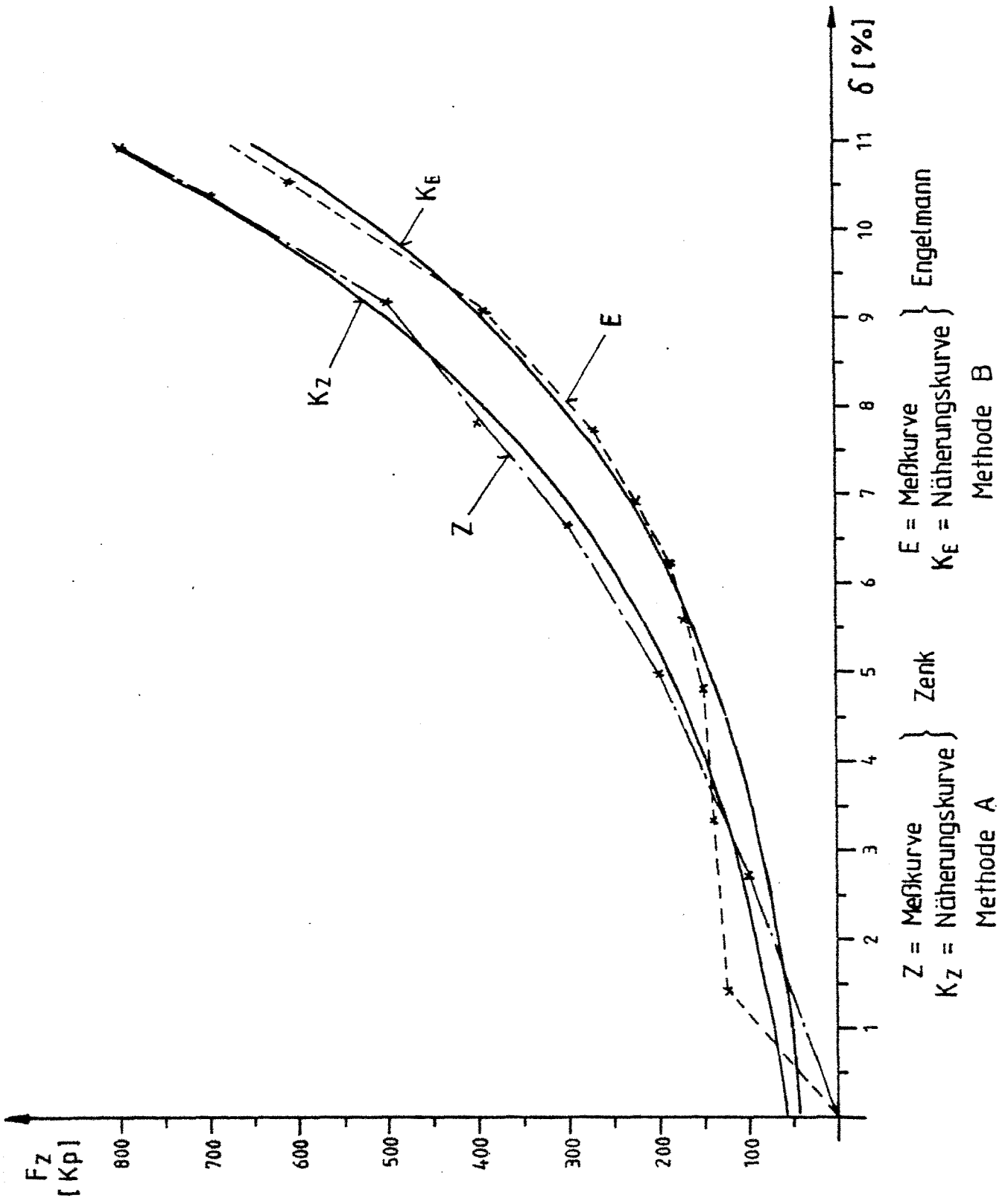


Bild 28: Reckkurven für 11mmØ-Perlonseil

Bild 28 ersichtlich, das die Meßreihen beider Untersuchungen sowie die jeweilige Approximation zeigt. Aufgetragen ist die Gesamtdehnung von Perlon (ohne Vorreckung) gegenüber der Zugkraft im Seil. Zu erkennen ist dabei ein Unterschied der beiden angenäherten Kurven von etwa 1 % bei gleicher Belastung. Bei 3700 m Perlonseil im Schnitt ergibt 1 % Unterschied 37 m Längendifferenz, also den errechneten Differenzwert. Eindeutig ist auch, daß die Reckberechnung nach Methode B um den oben genannten Betrag bessere Werte liefert als die Berechnung nach Methode A. Zu dieser Aussage gelangt man, wenn man die Minimalwerte der aufgezeichneten Druckregistrierungen der einzelnen Instrumente in Meter umrechnet und mit den berechneten Instrumententiefen beider Methoden vergleicht. Man sieht dabei, daß sich die Werte nach Methode A jenseits der Werte befinden, die sich aus der Berechnung nach Methode B ergeben. Auf Grund dieser Tatsache wird in den folgenden Kapiteln bei vereinfachten und aktuellen Stromprofilen nur die Berechnung des Perlonrecks nach Methode B berücksichtigt. Zu beachten ist, daß die Diagramme für die Verankerung N 264 zwar zum Vergleich berücksichtigt wurden, die Absolutbeträge jedoch sehr große Fehler (200 m) enthalten, da die verwendeten Längen mit einem defekten Meterrad abgemetert wurden. Der Fehler der Längenangabe beträgt etwa 10%. Diese Verankerung wird deshalb für weitere Vergleiche und Berechnungen nicht mehr berücksichtigt.

9.4 Verankerung N 184

In Tabelle 6 werden die wichtigsten Tiefen dieser Verankerung dargestellt. Betrachtet man Bild 29, so erkennt man, daß die Zugkraft im Seil bei N 184 durchschnittlich unterhalb von 230 Kp liegt. Nur oberhalb des Auslösers wird ein Wert von 298 Kp erreicht. Es sind also relativ kleine Kräfte im Seil wirksam, so daß zu erwarten ist, daß die Verankerung bei starken Stromlagen weniger stabil ist als eine Verankerung mit größerer durchschnittlicher Zugkraft im Seil (siehe N 276-1). Die Kraft, die auf den Anker wirkt, beträgt 256,5 Kp und ist damit bei einem Ankergewicht von 700 Kp hinreichend klein. In Bild 30 wird deutlich, daß der Restauftrieb im gesamten Tiefenbereich positiv ist. Die Verankerung wird also bei Brüchen oberhalb eines Auftriebselementes sicher zur Oberfläche zurückkehren. Der Absolutbetrag des Restauftriebes an der obersten Komponente beträgt 260,2 Kp.

Tabelle 3 gibt auch Auskunft über die unterschiedlichen Instrumententiefen bei verschiedener Reckberechnung. Oberhalb von 1500 m beträgt die Differenz einheitlich 39,3 m.

9.5 Verankerung N 230

Die Tiefendifferenzen durch die unterschiedlichen Berechnungsmethoden betragen bei N 230 im Stahlseilbereich 41,2 m, welches eine gute Übereinstimmung mit den Werten von N 184 und N 264 ergibt (Tabelle 4).

Auch die Verankerung N 230 gehört zu denjenigen mit vergleichbar geringer Zugkraft im Seil. Der Bereich erstreckt

Verankerung N 184

Berechnete Instrumententiefen

Komp.Nr.	Tiefe in (m)		Beschreibung
	n.Engelmann	n.Zenk	
1	649,0	688,7	oberster Auftrieb
4	662,7	702,0	A-VTPL
19	1570,7	1610,5	A-VTL
25	3074,1	3097,6	A-VT
30	4759,9	4765,3	A-VT
35	5251,1	5251,2	Auslöser
	5260,0		Boden

Oberhalb von 1500 m ergibt sich eine Differenz von

$Z = 39,3$ zwischen beiden Berechnungen

A-V	Aanderaa-Strommesser		
A-VT	"	mit Temperaturmessung	
A-VTP	"	mit Temperatur- und Druckmessung	
A-VTPL	"	mit Temperatur-, Druck- und Leitfähigkeitssensor	

Tabelle 3

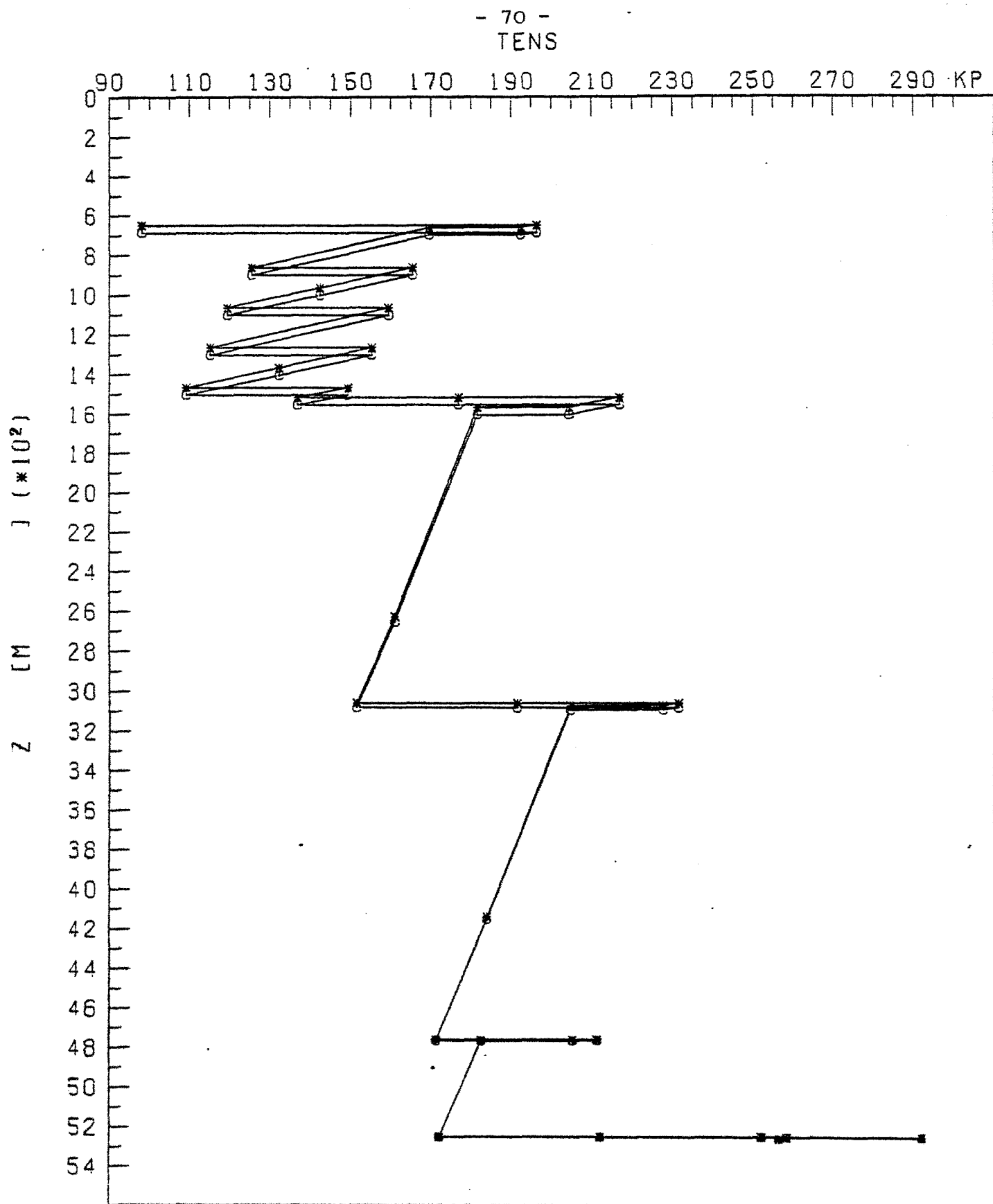


Bild 29: Zugkraft im Seil über die Tiefe für N 184
Vergleich der Reckberechnungsmethoden A(○) und B(*)

- 71 -
BACK

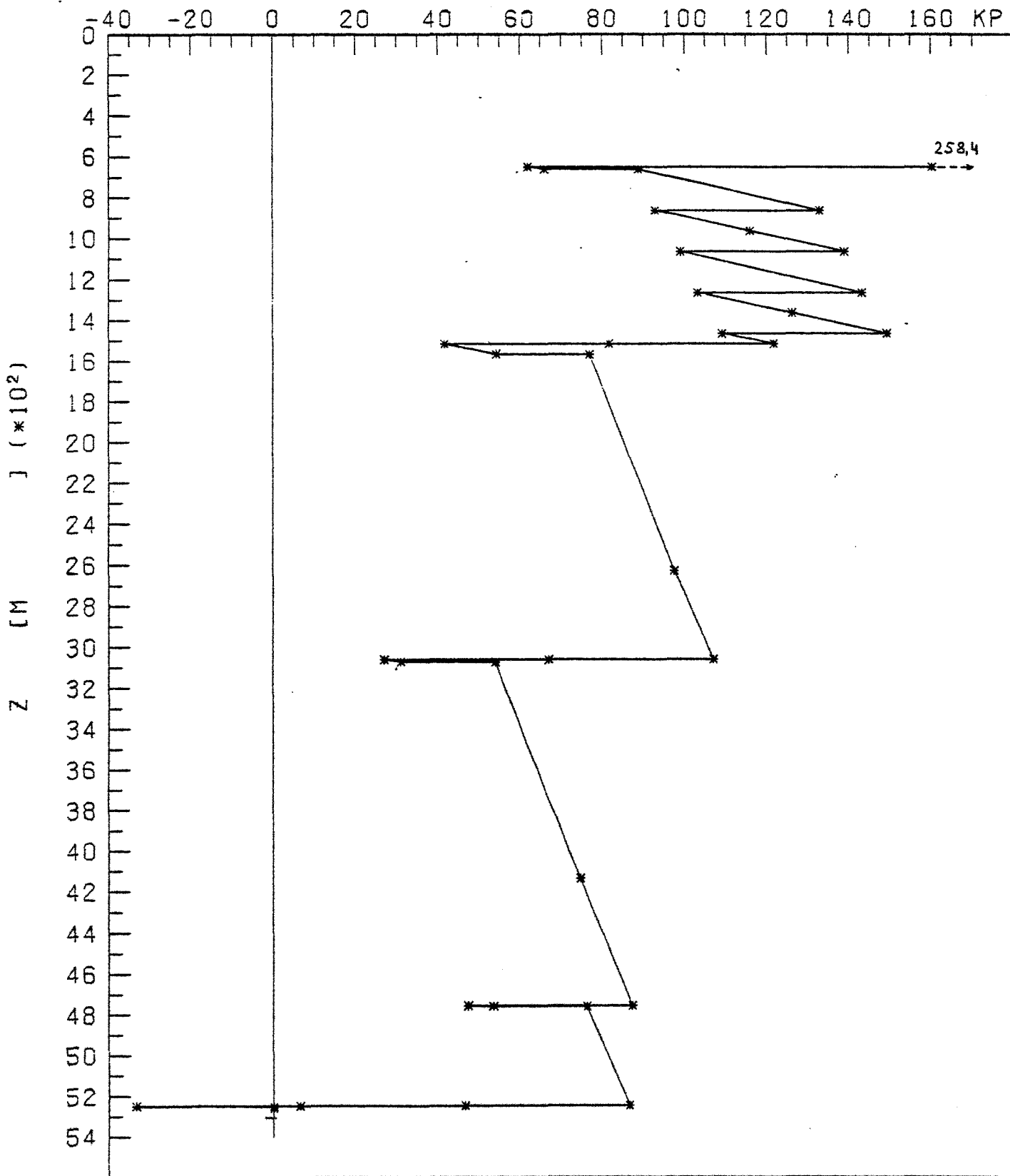


Bild 30: Restauftrieb über die Tiefe für N 184

sich von 220 Kp - 360 Kp. Die Kraft auf den Anker hat eine Größe von 301,7 Kp, so daß im Ruhezustand das Nettoankergewicht von nicht ganz 400 Kp groß genug ist (Bild 31).

Der Restauftrieb der obersten Komponente ist mit 341,2 Kp um etwa 80 Kp größer als bei N 184. Auch hier liegt die Verankerung mit allen Komponenten im positiven Auftriebsbereich (Bild 32). Diese NEADS-Verankerung wird also stabiler sein als Verankerung N 184 bei Anströmung. Sie wird allerdings nicht die Stabilität von N 276-1 erreichen.

9.6 Verankerung N 264

Wegen großer Fehler in der Längenabmessung der Seilstücke wird diese Verankerung nur zur Darstellung der unterschiedlichen Reckberechnungen verwendet. Aus Tabelle 5 geht hervor, daß die Differenz zwischen den beiden Methoden 39,7 m oberhalb des Perlonseils beträgt.

Die Zugkraft im Seil dieser Verankerung (Bild 33) umfaßt einen mittleren Bereich von 220 Kp bis 360 Kp ähnlich wie N 230. Allerdings werden die größten Werte nicht über dem Auslöser erreicht, sondern im oberen Teil bei etwa 1100 m Wassertiefe. Im Gegensatz dazu sieht die Verteilung des Restauftriebs im Vergleich zu N 230 ganz anders aus (Bild 34). Bereits unterhalb der obersten Komponente befindet sich der größte Teil der Verankerung im negativen Bereich des Restauftriebs. In Höhe der Auftriebspakete werden jedoch immer wieder positive Werte erreicht, so daß bei Abriß oberhalb dieser Auftriebskörper trotzdem ein Auftauchen der Restverankerung gegeben ist.

Verankerung N 230

Berechnete Instrumententiefen

Komp.Nr.	Tiefe in (m)		Beschreibung
	n.Engelmann	n.Zenk	
1	503,8	543,2	oberster Auftrieb
7	534,1	573,5	A-VTPL
21	1442,4	1481,8	A-VTL
27	2964,0	2987,6	A-VT
32	4052,1	4064,4	A-VT
37	4110,8	4122,6	Auslöser
	5300	5300	Boden

Oberhalb von 1500 m ergibt sich eine Differenz beider Berechnungen von $Z = 41,2 \text{ m}$

A-VTPL	Aanderaa-Strommesser mit Temperatur-, Druck- und Leitfähigkeitssensor
A-VTL	Aanderaa-Strommesser mit Temperatur- und Leitfähigkeitssensor
A-VT	Aanderaa-Strommesser mit Temperatursensor

Tabelle 4

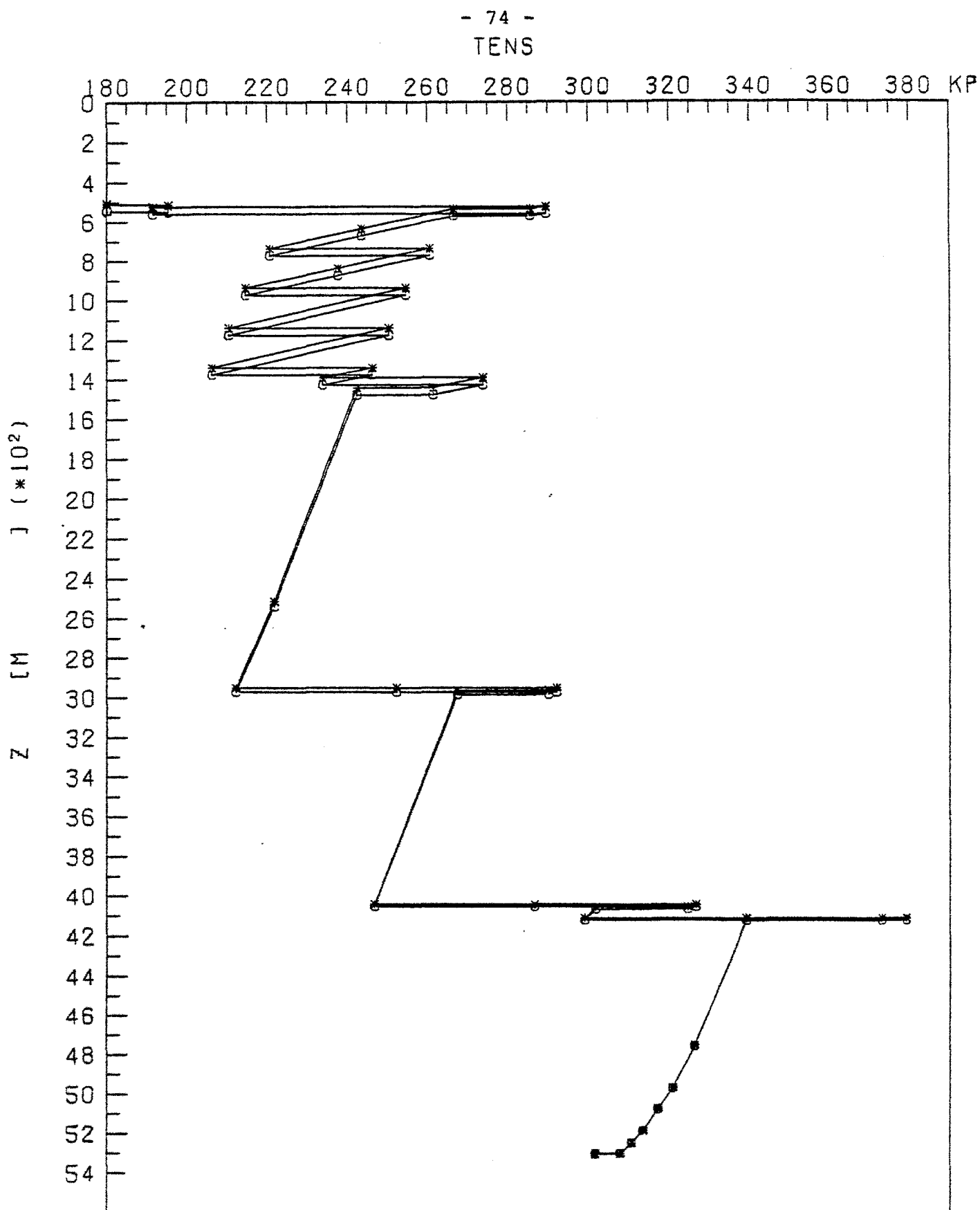


Bild 31: Zugkraft im Seil über die Tiefe für N 230
Vergleich der Reckberechnungsmethoden A(○) und B(✱)

BACK

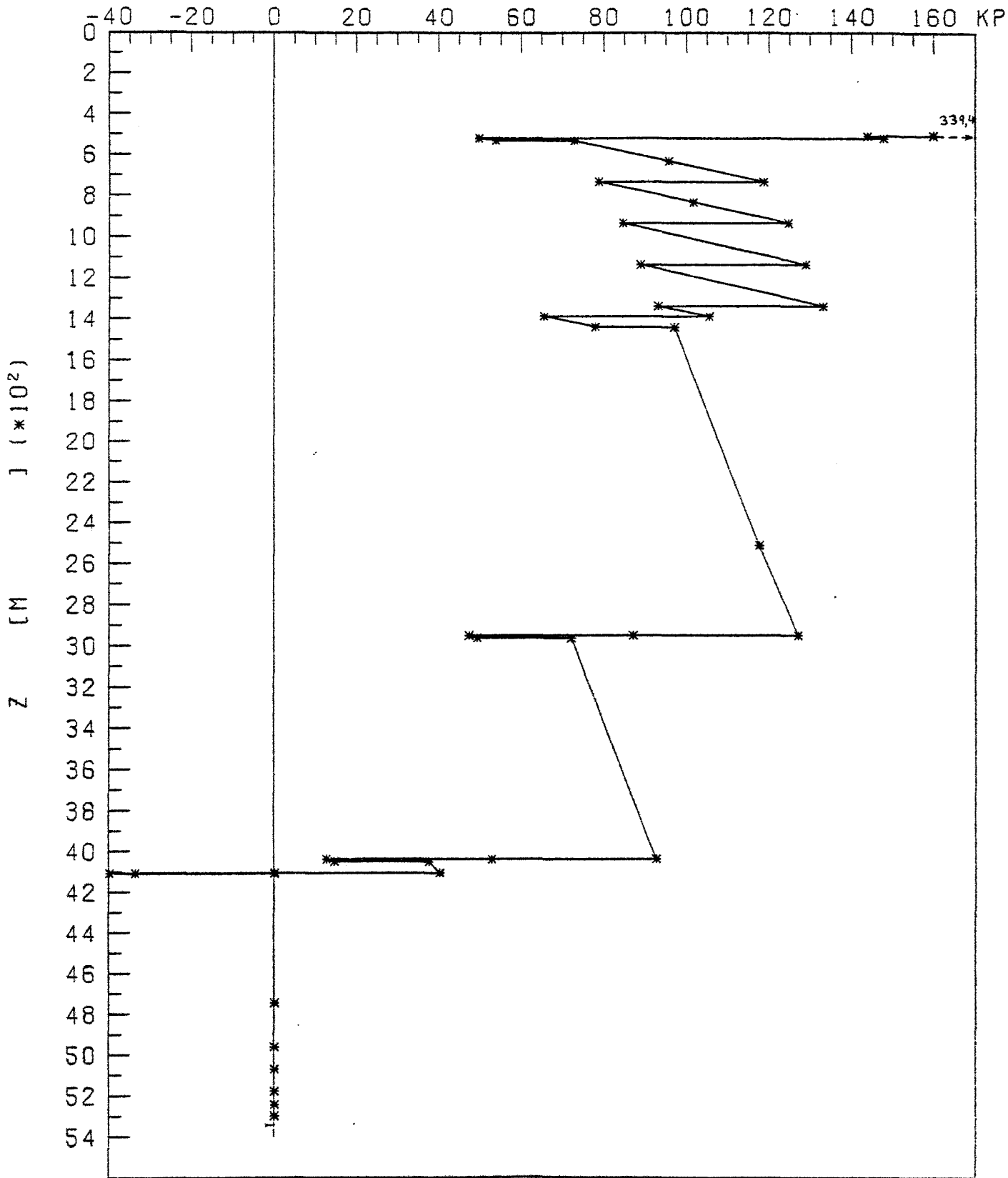


Bild 32: Restauftrieb über die Tiefe für N 230

Verankerung N 264

Komp.Nr.	Berechnete Instrumententiefen		Beschreibung
	Engelmann	Tiefe (m) Zenk	
1	248,0	287,7	oberster Auftrieb
3	259,8	299,5	A-VTPL
8	363,4	403,1	A-VTL
12	616,6	656,3	A-VTL
17	870,4	910,1	A-VTPL
24	1175,3	1215,0	A-VTL
29	1744,9	1780,8	A-VTPL
34	3147,8	3169,4	A-VT
41	4828,7	4833,1	A-VT
43	4857,8	4862,0	Auslöser
	5270,0		Boden

Oberhalb von 1500 m ergibt sich eine Differenz von

$Z = 39,7$ m zwischen beiden Berechnungen

A-VTPL	Aanderaa-Strommesser mit Temperatur-, Druck- und Leitfähigkeitssensor	
A-VTL	"	mit Temperatur- und Leitfähigkeitssensor
A-VT	"	mit Temperatursensor

Tabelle 5

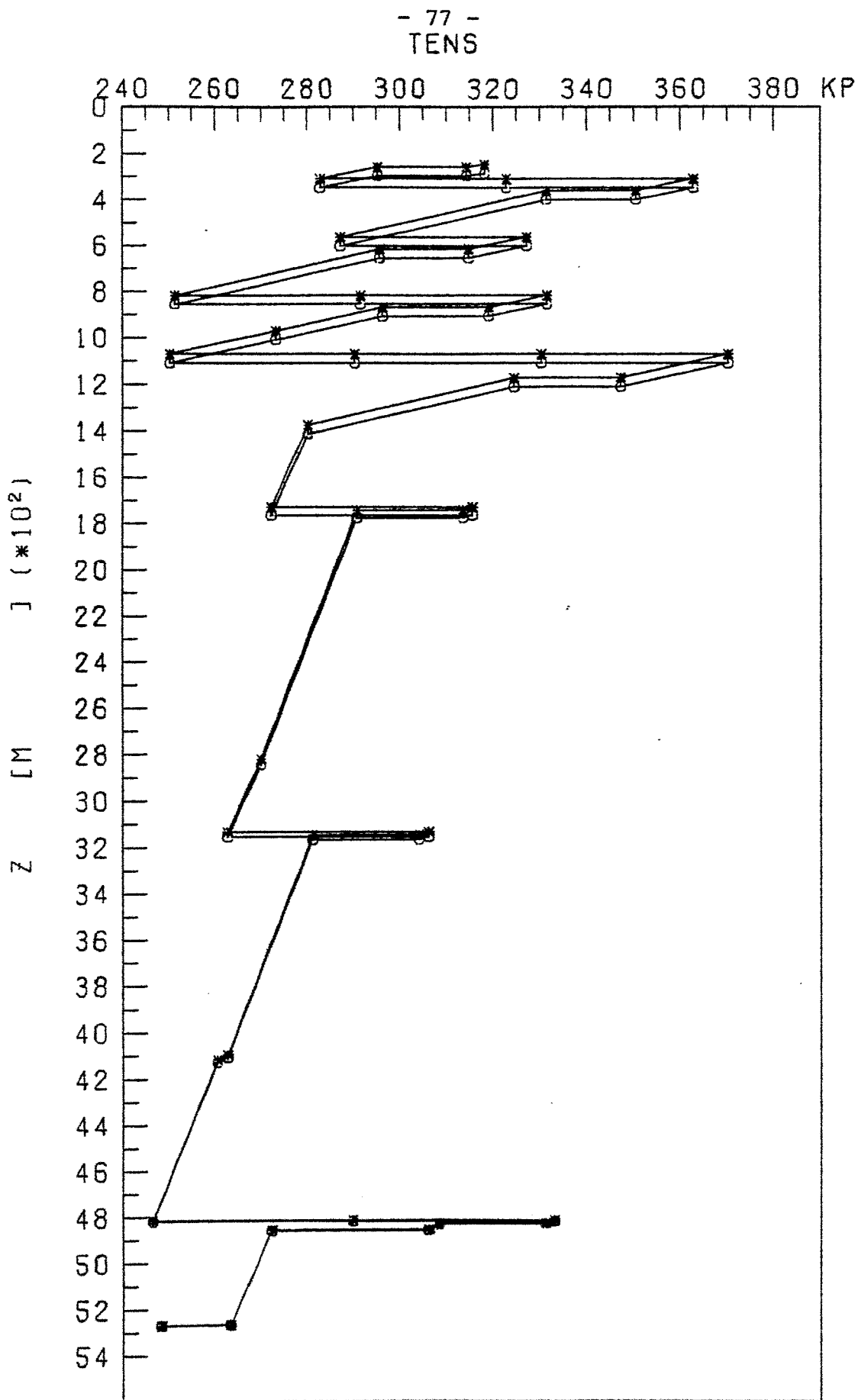


Bild 33: Zugkraft im Seil über die Tiefe für N 264
Vergleich der Reckberechnungsmethoden A(○) und B(*)

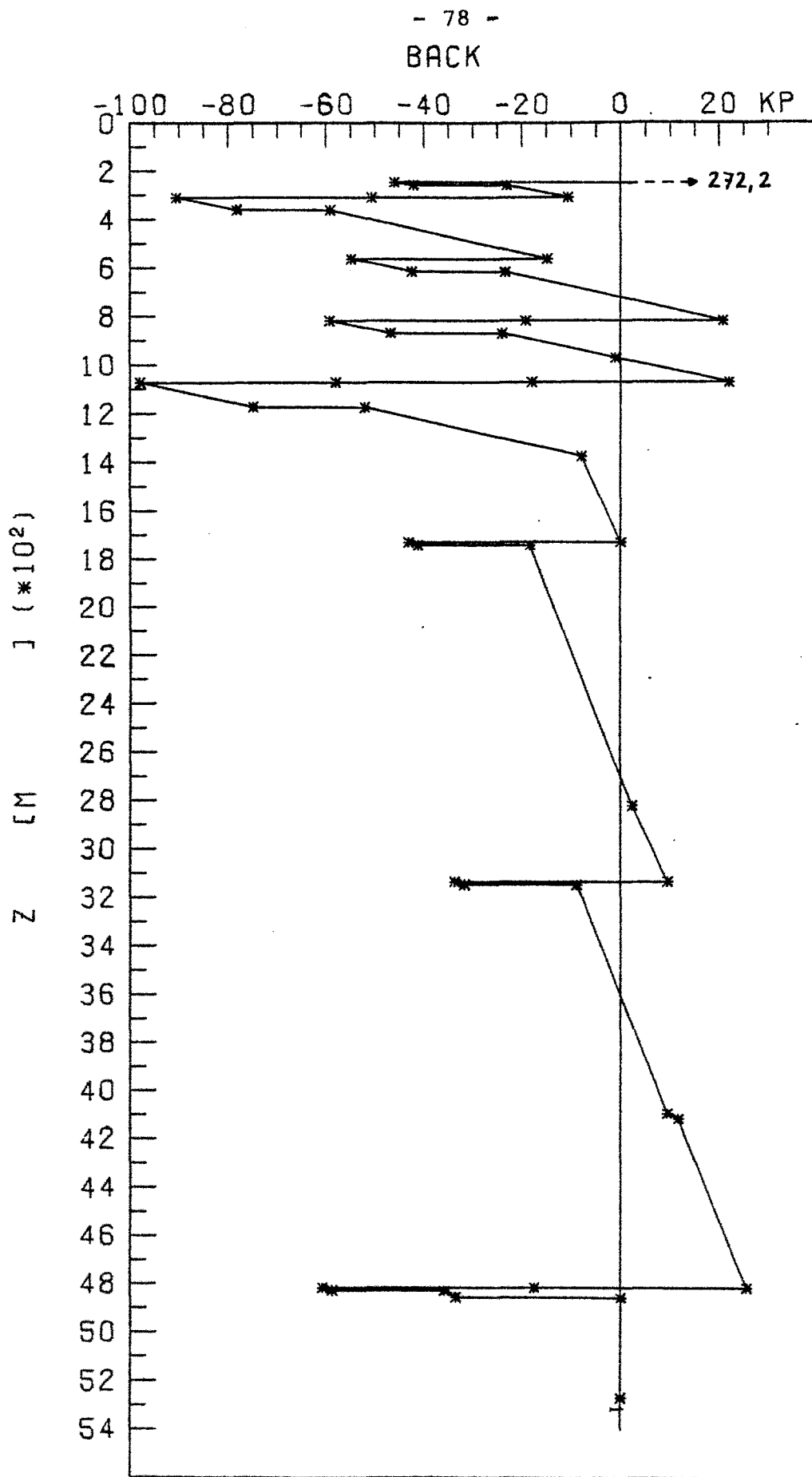


Bild 34: Restauftrieb über die Tiefe für N 264

9.7 Verankerung N 276-1

Diese Verankerung weist im Gegensatz zu den vier vorher erwähnten drei Besonderheiten auf. Zum einen bestehen die obersten 1500 m nicht aus Stahlseil, sondern aus Parafilseil von 11 mm Durchmesser, um das Seilgewicht zu senken, zum anderen enthält die Verankerung zwei Neigungsmesser, die einen Vergleich mit den errechneten Neigungen des Programms erlauben. Außerdem ist diese Verankerung die einzige in dieser Betrachtung, die nicht vollständig geborgen werden konnte. Es stehen aber dennoch Meßdaten von 10 Geräten zur Verfügung. Darunter sind 3 Druckmesserzeitreihen, die gute Vergleiche für die Betrachtung der aktuellen Stromdaten ermöglichen. Leider ist einer der Neigungsmesser wegen fehlender Eichkurven nicht auswertbar. Tabelle 6 zeigt die einzelnen Instrumententiefen der Verankerung im strömungslosen Zustand. Bis zu einer Tiefe von 1600 m liegt die Differenz in der Reckberechnung bei 35,4 m. Dieser Wert ist etwas geringer als bei den Verankerungen N 184, N 230 und N 264, was aber durch die Dehnungskurven des Perlonseils in Bild 28 zu erklären ist. Bei höheren Zugkräften im Seil werden die Kurven steiler und die Differenz in der Längenänderung beider Berechnungen damit kleiner. Wie Abb 35 zeigt, liegt die Zugkraft dieser Verankerung in einem sehr hohen Bereich, nämlich zwischen 340 Kp und 460 Kp und damit weit über dem der anderen Verankerungen. Die Charakteristik des Restauftriebs ähnelt der von Verankerung N 264, wobei aber auffällt, daß die Spitzen im positiven Bereich nicht so ausgeprägt sind (Bild 36). Dieses deutet auf

Verankerung N 276-1

Berechnete Instrumententiefen

Komp.Nr.	Tiefe (m)		Beschreibung
	Engelmann	Zenk	
1	135,5	170,9	oberste Komponente (Auftrieb)
4	148,6	184,0	A-VTPL
8	252,1	287,5	A-NM
9	253,6	289,0	A-VT
10	255,1	290,5	Datalogger für TK
15	559,4	594,8	A-VTL
16	560,8	596,3	Datalogger für TK
21	764,7	800,1	A-NM
22	766,2	801,6	A-VTP
25	1069,2	1104,6	A-VT
28	1171,9	1207,3	A-VT
32	1675,5	1710,9	A-VT
35	3037,7	3059,8	A-VT
38	4724,9	4730,5	A-VT
44	5250,2	5250,6	A-VT
47	5274,7	5274,9	Auslöser
	5300,0		Boden

Die Differenz oberhalb von 1500 m beträgt = 35,4 m

A-V	Aanderaa-Strommesser	
A-VT	"	mit Temperaturmessung
A-VTP	"	mit Temperatur- und Druckmessung
A-VTPL	"	mit Temperatur-, Druck- und Leitfähigkeitssensor
A-VTL	"	mit Temperatur- und Leitfähigkeitsmesser
A-NM	Neigungsmesser	
TK	Thermistorkette	

Tabelle 6

eine geringere Sicherheitsreserve bei Abriß des Hauptauftriebskörpers hin.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Zuordnung der Zugkräfte im Seil der einzelnen Verankerungen untereinander bietet Bild 37. Es zeigt die Verankerungen N 184, N 230, N 264 und N 276-1 eingeordnet in das Spektrum der Zugkraft von 30 Kp bis 460 Kp. Wie bereits erwähnt, nimmt die Stärke des Seilzuges in der oben genannten Reihenfolge zu und damit auch die Stabilität der Verankerung.

Da Verankerung J 226 in Hinsicht auf das verwendete Material und die Einsatztiefe eine Ausnahme bildet, wurde hier auf eine Darstellung zusammen mit den NEADS-Verankerungen verzichtet.

Ein Maß für die Stabilität einer Verankerung gibt auch Fofonoff (1965) an. Danach wird bei Tiefwasserverankerungen wegen der Abnahme der Stromgeschwindigkeit mit der Tiefe der Hauptanteil des horizontalen Strömungswiderstandes durch die obersten 10 bis 20 Prozent der Verankerung aufgebracht. Dadurch kann die Wirkung des horizontalen Widerstandes durch eine horizontale Kraft gleicher Größe angenähert werden, die an der obersten Komponente angreift.

Für kleine Auslenkungen ist die rückstellende Kraft proportional zur Auslenkung der obersten Komponente aus der vertikalen Gleichgewichtsposition.

Weil die auftretenden Kräfte, hervorgerufen durch die Beschleunigungen, vernachlässigbar klein zu den übrigen Kräften

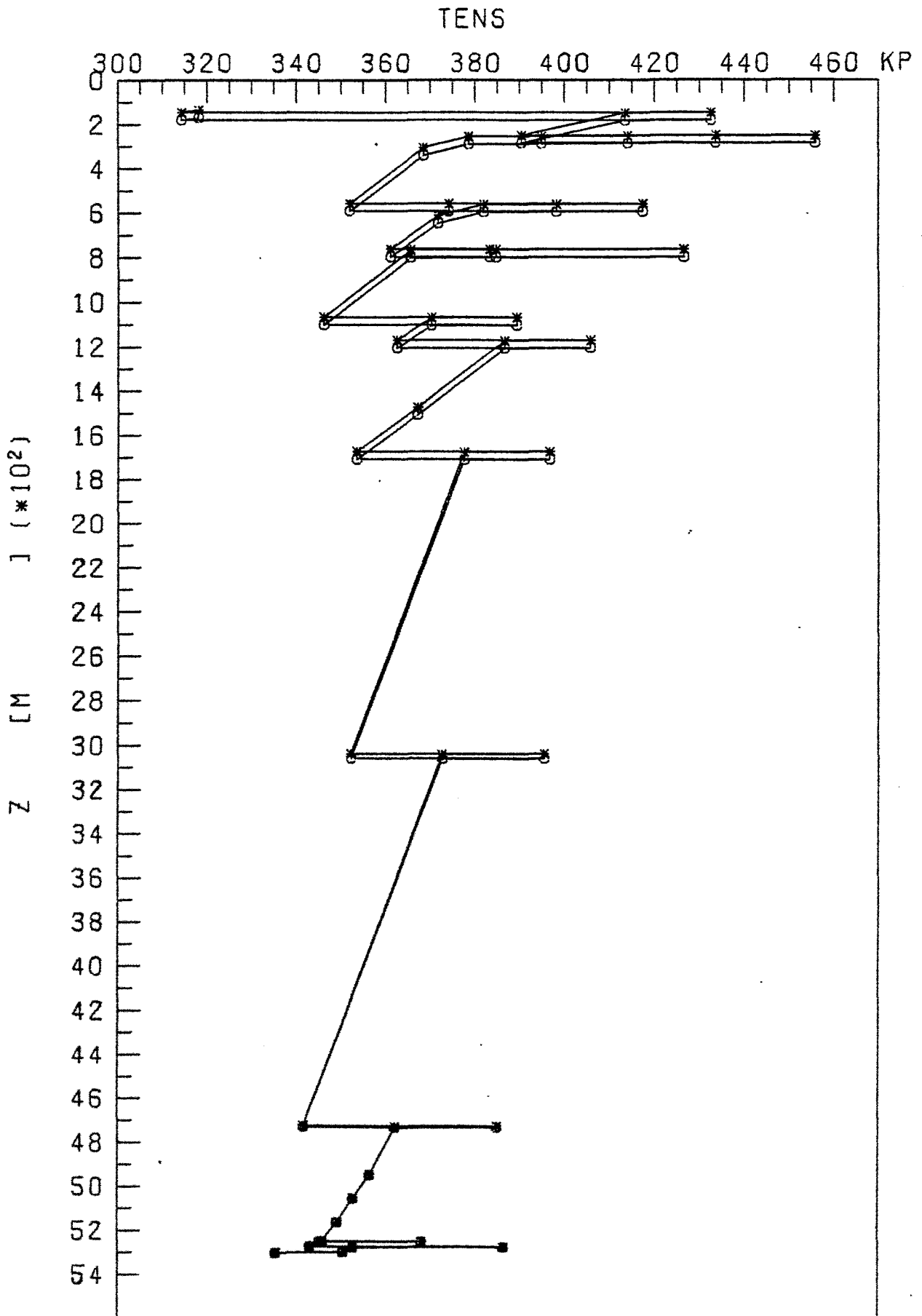


Bild 35: Zugkraft im Seil über die Tiefe für N 276-1
Vergleich der Reckberechnungsmethoden A(○) und B(✱)

BACK

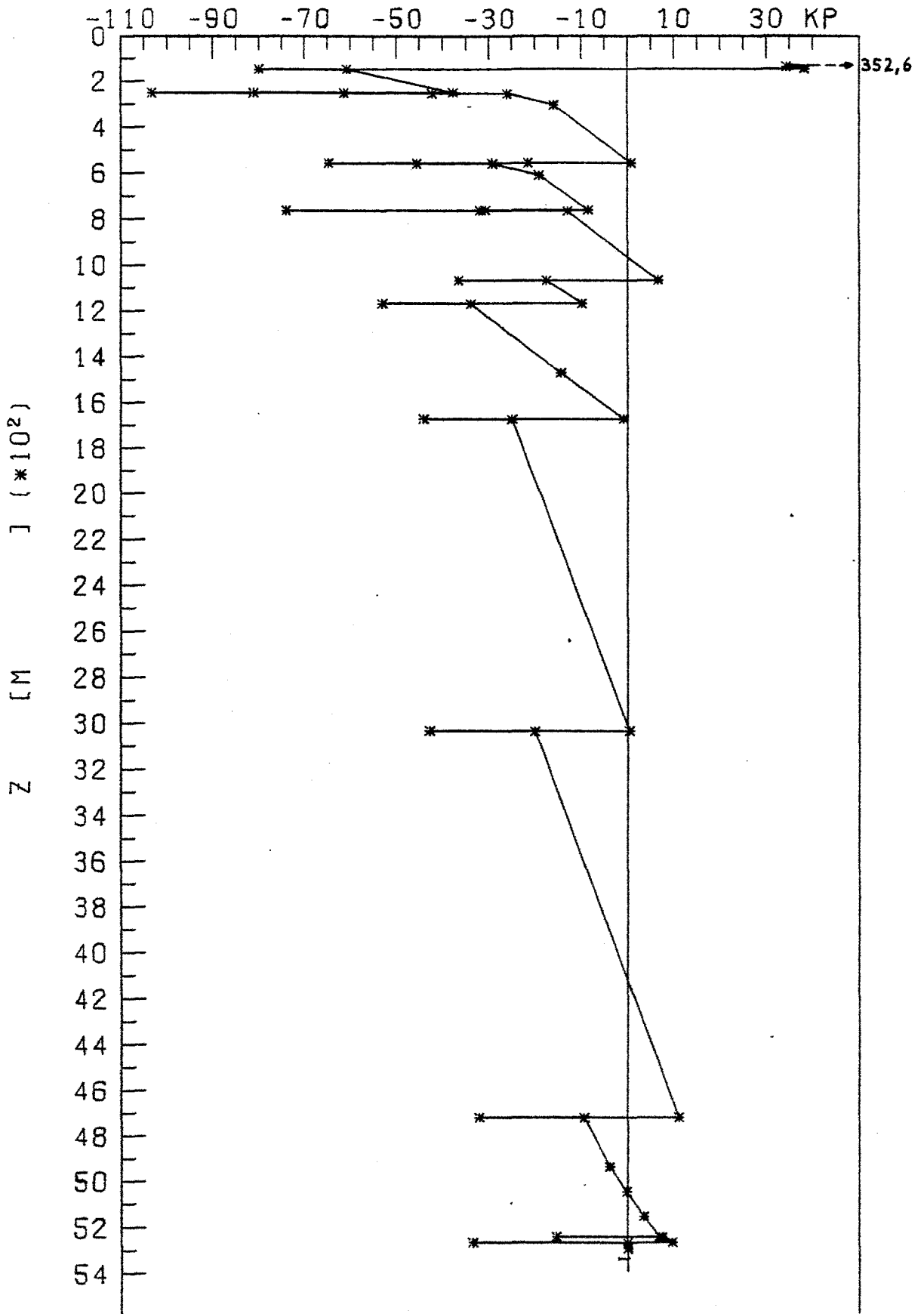


Bild 36: Restauftrieb über die Tiefe für N 276-1

sind, ergibt sich folgende Gleichgewichtsgleichung

horizontale Widerstandskraft = horizontale rückstellende Kraft

$$\frac{1}{2} \cdot s \cdot c_0 \cdot H \cdot v^2 = B_B \cdot \frac{E_{xc}}{L_v}$$

B_B = Auftrieb der obersten Komponente

E_{xc} = horizontale Auslenkung

L_v = Länge der Verankerung

aufgelöst nach E_{xc} ergibt sich:

$$E_{xc} = C \cdot v^2$$

$$\text{mit } C = \frac{1}{2} s c_0 H \frac{L_v}{B_B} = C_1 \cdot \frac{L_v}{B_B}$$

Der Koeffizient C liefert nun Aussagen über die Stabilität einzelner Verankerungen. Je größer der Koeffizient C ist, um so größer sind die Horizontalauslenkungen der obersten Komponente bei gleicher Stromgeschwindigkeit.

Für alle fünf Verankerungen wurden nun die Koeffizienten berechnet, und es ergibt sich für

$$N 184 \quad C = 23,35 \cdot C_1$$

$$N 230 \quad C = 18,173 \cdot C_1$$

$$N 264 \quad C = 16,188 \cdot C_1$$

$$N 276-1 \quad C = 11,84 \cdot C_1$$

$$J 226 \quad C = 4,91 \cdot C_1$$

Inwiefern der Wert für J 226 richtig ist durch die sehr unterschiedliche Länge zu den NEADS-Verankerungen, läßt sich

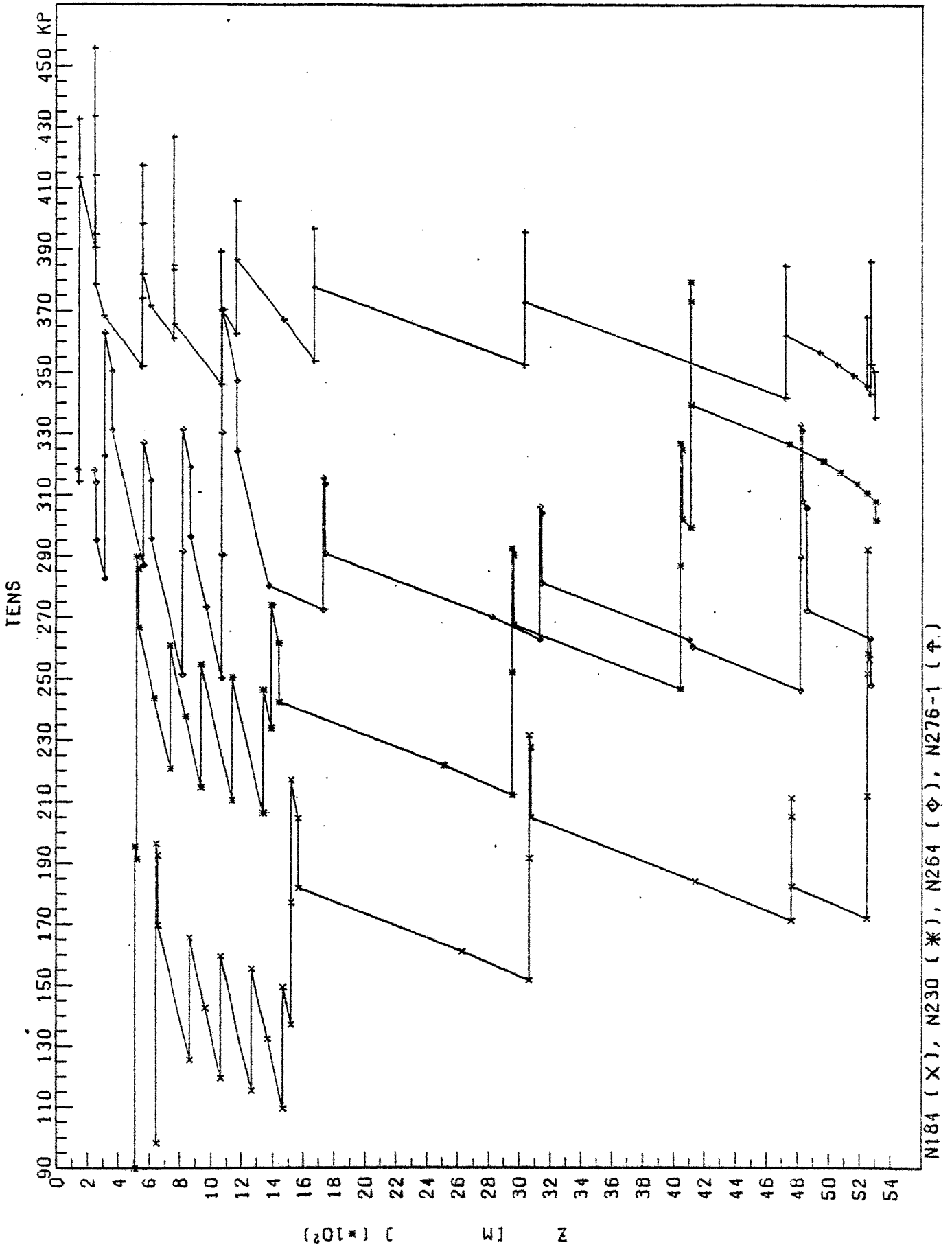


Bild 37: Zugkraftspektrum der NEADS-Verankerungen

schwer sagen, aber es steht fest, daß diese Verankerung erst bei sehr viel höheren Stromgeschwindigkeiten gleiche Auslenkungen erreicht wie die anderen Verankerungen. Sie ist also die stabilste der betrachteten Verankerungen.

10. Verhalten der Verankerungen N 184, N 230, N 276-1
und J 226 in vereinfachten Stromprofilen

Einen ersten Überblick über das Verhalten der Verankerungen bei verschiedenen Stromlagen bieten vereinfachte Stromprofile. Dazu wurden 4 Profiltypen ausgewählt, die in Bild 38 zusammenfassend gezeigt werden.

Profil 1:

Linear abnehmende Stromstärke mit der Tiefe, die am Boden Null wird. Der Strom kommt aus nur einer Richtung.

Gerechnet wurden Profile mit 0,2 m/s und 0,3 m/s Oberflächenstrom.

Profil 2:

Konstante Stromgeschwindigkeit über die gesamte Wassersäule aus einer Richtung mit einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.

Profil 3:

Monoton abnehmende Stromgeschwindigkeit mit der Tiefe sowie Oberflächenschicht mit konstanter Geschwindigkeit. Dabei wurde mit einer Schicht von 150 m bei den NEADS-Verankerungen und 50 m bei J 226 sowie einem Potentialkoeffizienten von 0,4 gerechnet (siehe Unterprogramm CURVE, Stromprofil 1). Um Vergleiche mit Profil 4 zuzulassen, wurde außerdem mit einem Koeffizienten von 0,6 und verschiedenen Schichtdicken gerechnet.

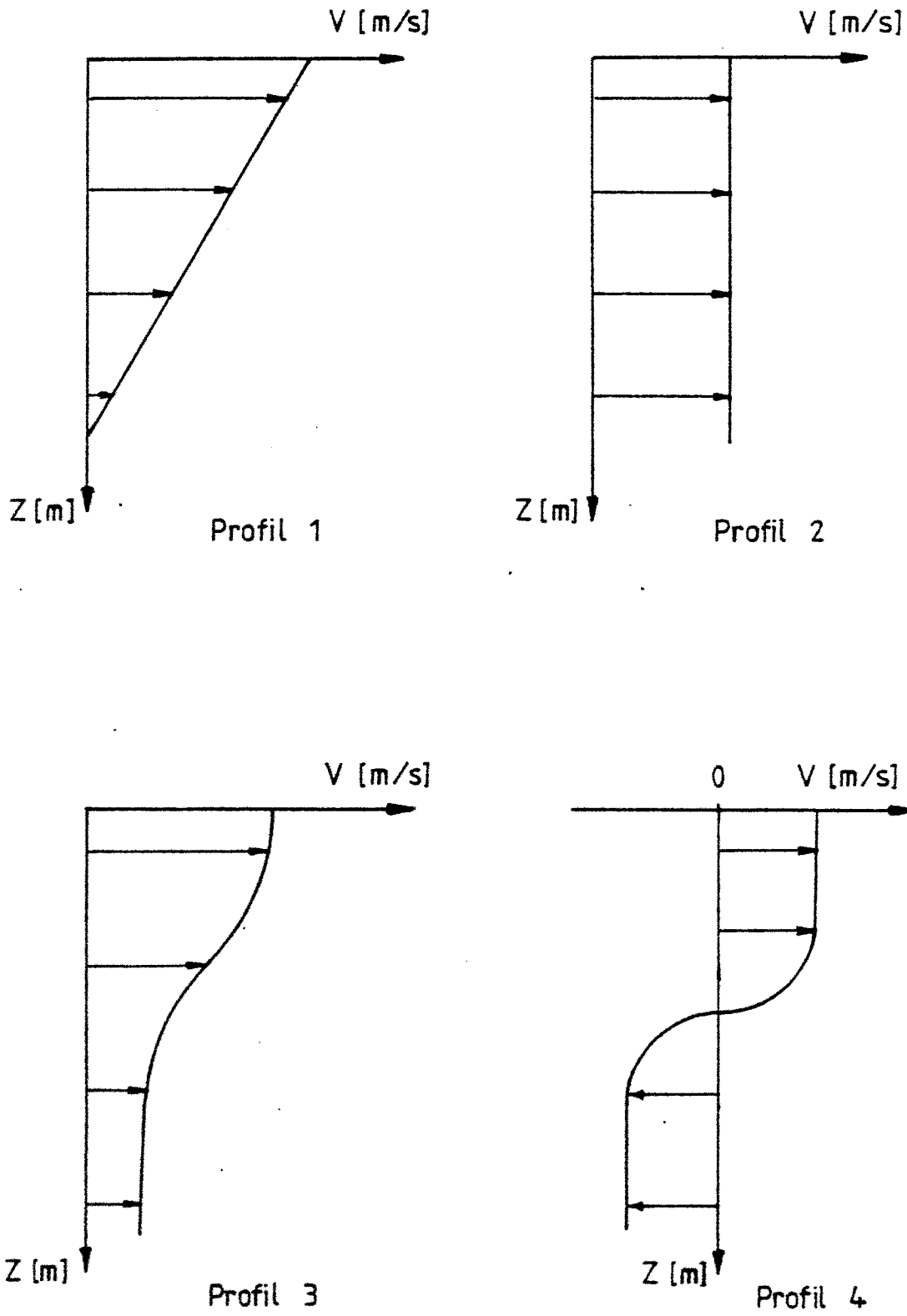


Bild 38: Vereinfachte Stromprofile

Die Stärke der Schicht mit konstantem Strom wurde gewählt

für	J 226	-	180 m
	N 184	-	1100 m
	N 230	-	800 m
	N 276-1	-	400 m

Die Oberflächenströme betrugen bei NEADS 0,2 m/s und bei JASIN 0,5 m/s.

Diese Wahl der Stromstärken ist gerechtfertigt, wenn man die unterschiedlichen geographischen Gegebenheiten berücksichtigt.

Profil 4:

Hierbei handelt es sich um ein Stromprofil mit 2 Schichten konstanter Geschwindigkeit, die entgegengesetzte Stromrichtungen aufweisen. Zwischen beiden befindet sich eine etwa 70 m dicke Scherungszone, in deren Mitte die Strömung den Wert Null erreicht. Diese Nulltiefe wurde nun so gewählt, daß sie innerhalb der obersten 200 m der geneigten Verankerung liegt. Die Tiefen sind unter Profil 3 angegeben.

Berücksichtigt man diesen Ansatz nicht und wählt die Nulltiefe anhand der Verankerung im stromlosen Fall, so taucht diese unter die Nulltiefe ab und man erhält den unter Profil 2 behandelten Zustand. Das bedeutet, man berechnet einen Fall ohne Stromrichtungsänderung.

Die folgende Auswertung gliedert sich in drei Teile, die unterschiedliche Interpretationen ermöglichen.

10.1 Vergleich der NEADS-Verankerungen N 184, N 230 und N 276-1 bei verschiedenen Stromprofilen

Hierzu wurden zu jedem vereinfachten Stromprofil die Abweichungen der Komponenten der drei Verankerungen von der Ankerposition über die Tiefe aufgetragen. Zur besseren Unterscheidung wurde für jede eingetragene Verankerung ein anderes Symbol gewählt. Die Symbole stehen an den Stellen, an denen auf eine neue Komponente in der Verankerung übergegangen wird.

Die Symbole für die Verankerungen sind:

$$\text{X} = \text{N 276-1}$$

$$\Delta = \text{N 230}$$

$$\ast = \text{N 184}$$

a) Stromprofil 1 mit 20 cm/s Oberflächenstromgeschwindigkeit (Abkürzung 2. LIN)

Erwartungsgemäß zeigt Bild 39, daß N 184 auf Grund ihrer geringen Seilzugkraft die größte Abweichung vom Anker aufweist.

Ein Widerspruch zu Kapitel 9.7 scheint die größere Ablenkung von N 276-1 gegenüber N 230 zu sein, da ja N 276-1 eine um durchschnittlich 120 Kp größere Zugkraft im Seil hat. Sie sollte deshalb eigentlich ein stabileres Verhalten zeigen. Geklärt wird dieses scheinbare Fehlverhalten durch die größere Länge von N 276-1 von 368,3 m gegenüber N 230. Daraus ergibt sich eine zusätzliche Fläche von $7,23 \text{ m}^2$, die durch das linear abnehmende Stromprofil in einer Region höherer Stromgeschwindigkeiten liegt und

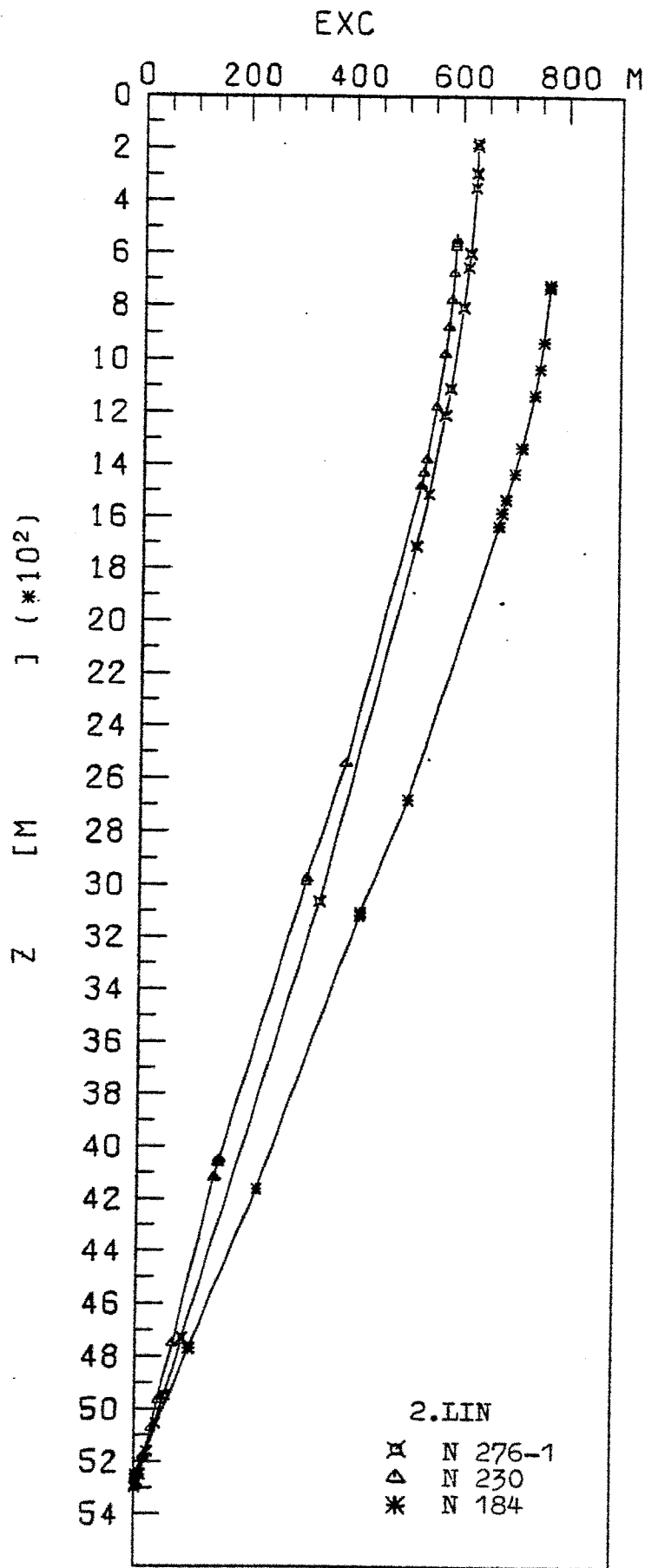


Bild 39: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 2.LIN (Auslenkung vom Anker)

damit einen höheren Anströmwiderstand bietet, so daß eine größere Ablenkung resultiert.

b) Stromprofil 1 mit 30 cm/s Oberflächenstrom (Abkürzung 3. LIN)

Ähnlich wie die vorherige Abbildung, zeigt Bild 40 das gleiche Verhalten der Verankerungen relativ zueinander. Allerdings sind die Dimensionen weitaus größer. Die Lotpunktabweichung vom Ankerstein hat sich bei allen Verankerungen nahezu verdoppelt, so daß die Abtauchstrecken der obersten Komponente jeder Verankerung sich mehr als verdreifacht haben. Genaue Zahlenwerte gibt Tabelle 7 am Schluß dieses Kapitels.

Die leichten Knickpunkte der Kurve von N 230 in etwa 3100 und 4100 m Tiefe zeigen die an dieser Stelle befindlichen starken Auftriebskörper, die durch ihre große senkrecht nach oben wirkende Kraft die Neigung des Seils etwas verringern. Die Absolutwerte der Seilneigung werden in den Zeichnungen dieses Abschnittes nicht richtig wiedergegeben wegen der Überhöhung der Abzisse gegenüber der Ordinate.

c) Stromprofil 2 mit konstantem Strom von 20 cm/s über die ganze Tiefe (Abkürzung 2. KON)

Dieses Profil ist zum Vergleich der Verankerungen untereinander im Hinblick auf Stabilitätsuntersuchungen besser geeignet als Profil 1, da an jeder Komponente eine gleich große Stromgeschwindigkeit angreift und die Einflüsse durch unterschiedliche Längen der Verankerung kleiner werden.

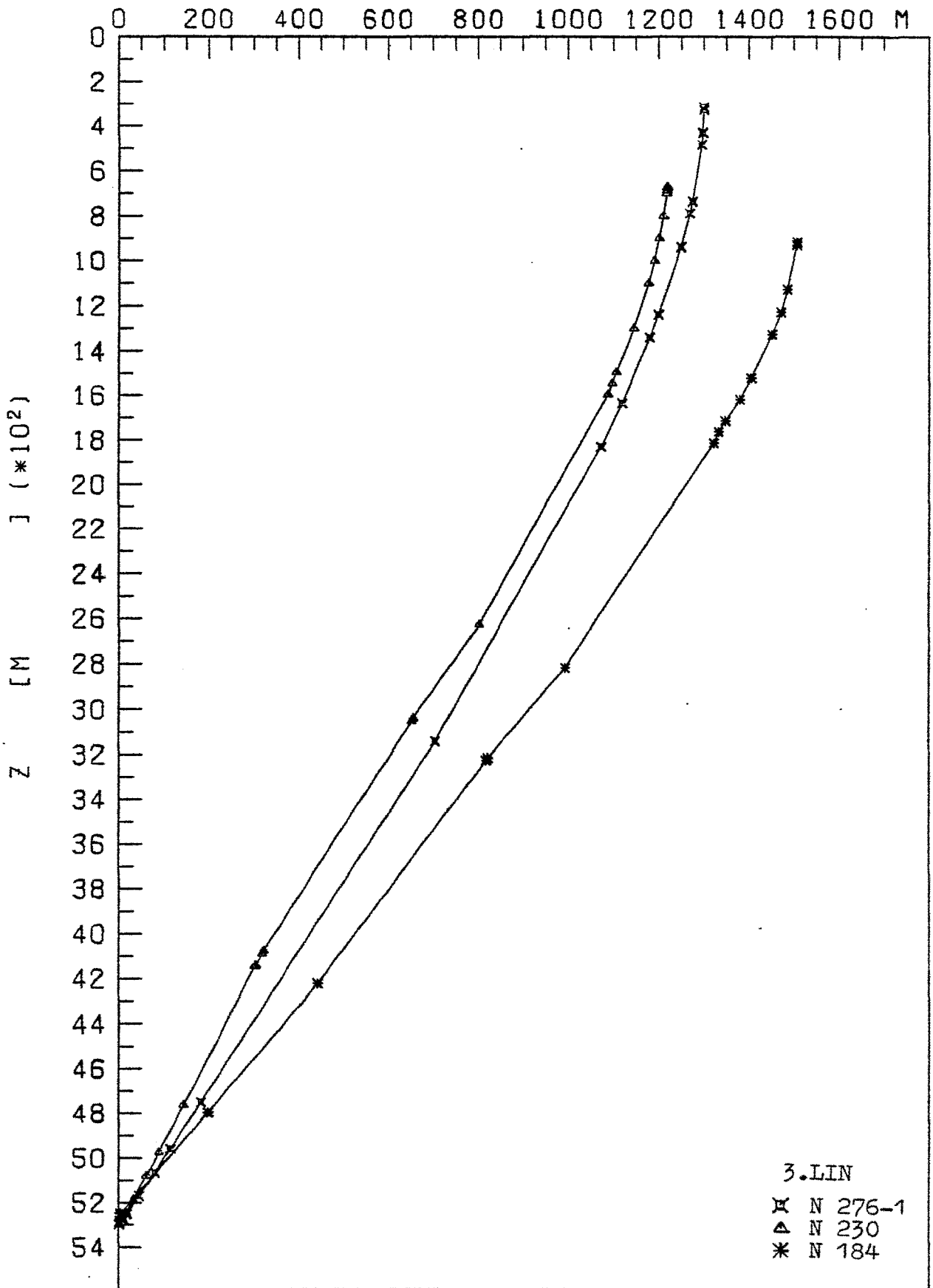


Bild 40: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 3.LIN (Auslenkung vom Anker)

EXC

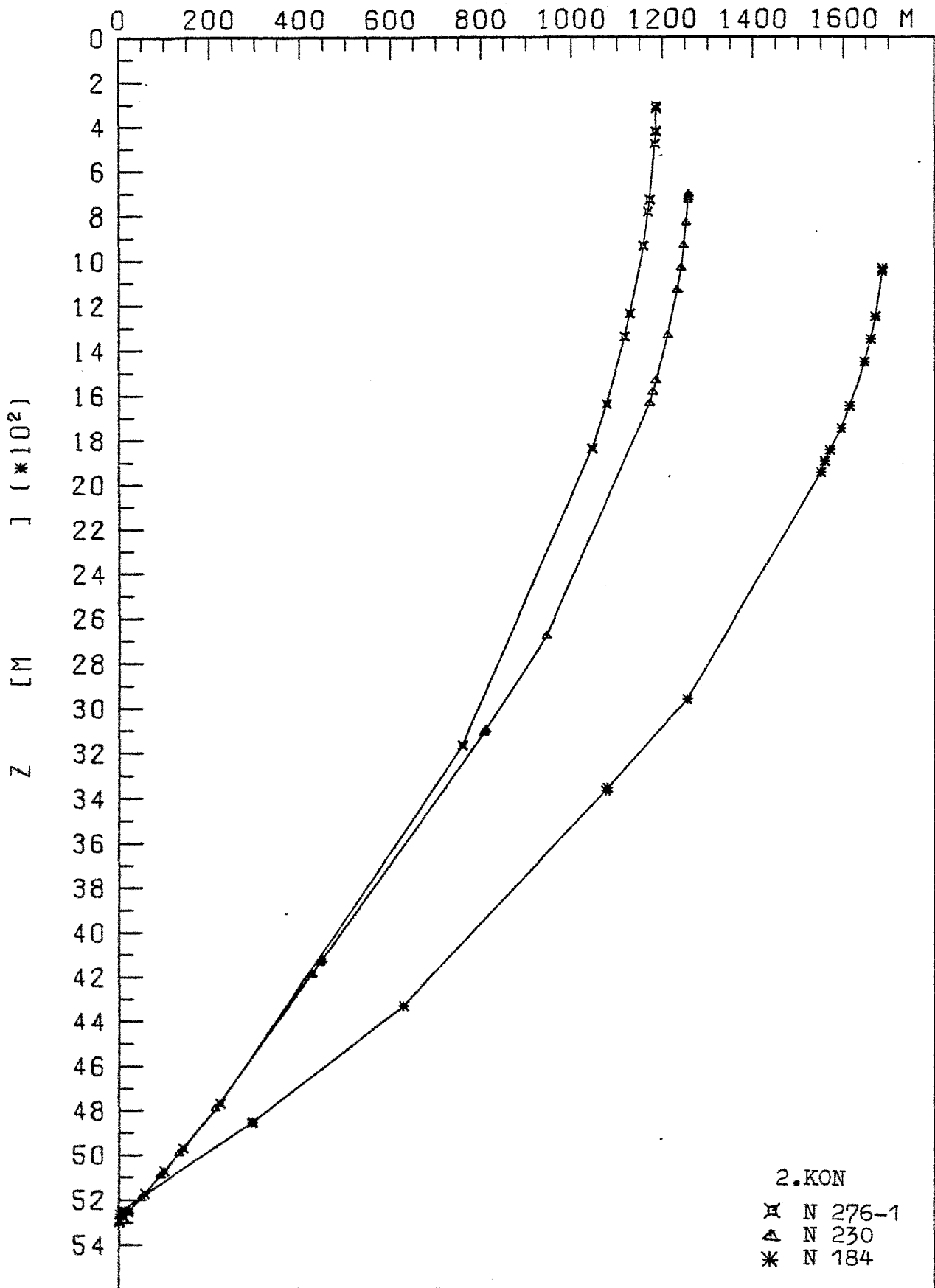


Bild 41: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 2.KON (Auslenkung vom Anker)

Zwar ist die Anströmfläche von N 276-1 zu N 230 um den gleichen Betrag größer, jedoch befindet sie sich nicht in einer Region größerer Stromgeschwindigkeit, so daß das quadratische Glied in der Berechnung der Widerstandskräfte nicht zum Tragen kommt. So zeigt Bild 41 die richtigen Relationen in der Stabilität der Verankerungen.

N 230 und N 184 zeigen in diesem Profil ihre größten Abweichungen aus der Ruhelage, während N 276-1 im Vergleich zu 3. LIN eine geringere Ablenkung erfährt, was auf die geringeren Stromstärken im oberen Teil zurückzuführen ist.

d) Stromprofil 3 mit 20 cm/s Oberflächenstrom und 150 m starker Schicht konstanter Geschwindigkeit (Abkürzung 2. PRO)

Durch die Festlegung der Tiefe mit starkem Geschwindigkeitsgradienten auf 150 m für alle drei Verankerungen, erhält man natürlich unterschiedlich starke Einflüsse, die abhängig von der Konstruktion und Länge der Verankerung sind. Ähnlich wie in Profil 1 werden die Veränderungen in der Positionierung der Komponenten bei N 276-1 am größten sein, da die Stromscherung den oberen Teil der Anordnung noch erreicht. Wie Bild 42 zeigt, ist daher die Horizontalabweichung sogar noch etwas größer als bei N 184.

EXC

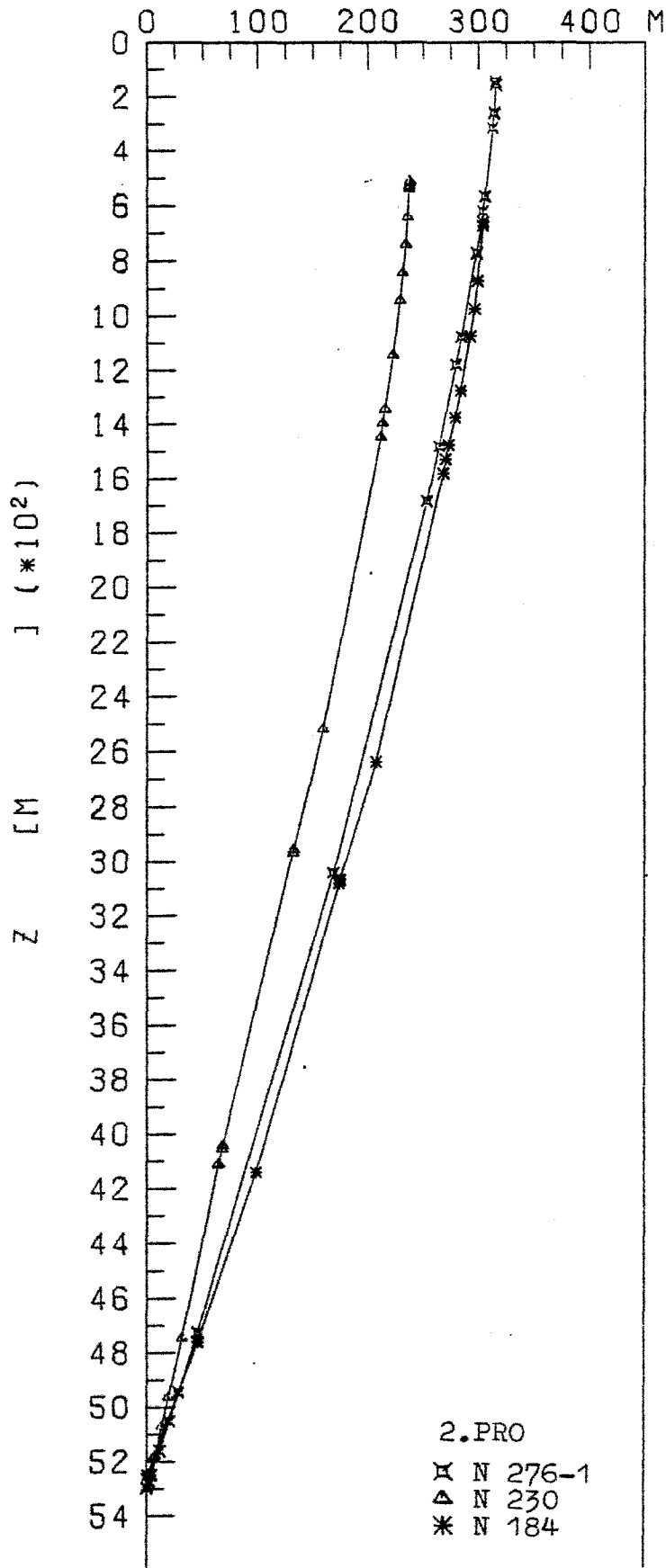


Bild 42: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 2.PRO (Auslenkung vom Anker)

e) Stromprofil 3 mit 20 cm/s Oberflächenstrom und variabler Schichtdicke für das konstante Stromband (Abkürzung 2. PRZ)

Als Schichtdicke für die Region konstanter Geschwindigkeit wurden Werte gewählt, die die Stromscherung in die obersten 200 m der Verankerung bringen.

Das ergibt für	N 184	- 1100 m
	N 230	- 800 m
	N 276-1	- 400 m

Diese variable Tiefe relativiert ähnlich wie Profil 2 das Abtauchverhalten untereinander, so daß man hier zu den gleichen Stabilitätsaussagen gelangt. Die Erhöhung der Oberflächenschichtdicke bis auf das etwa 7-fache des vorangegangenen Profils ergibt logischerweise auch größere Abtauchtiefen und damit erhöhte Auslenkungswerte. Der Vergrößerungsfaktor der Auslenkung beträgt bei N 184 = 3,54, bei N 230 = 2,83 und bei N 276-1 nur 1,44, was gleichfalls ein Indiz für zunehmende Stabilität der Verankerungen ist.

f) Stromprofil 4 mit 20 cm/s Stromgeschwindigkeit (Abkürzung 2. DEV)

Die Nullstromtiefe entspricht hier der unter Abschnitt e) angegebenen Tiefe für die einzelnen Verankerungen, allerdings kehrt sich unterhalb davon die Stromrichtung um. Es ist somit ein Vergleich mit 2. PRZ möglich, um den Einfluß der Stromrichtung abschätzen zu können. Da nur die oberen 200 m jeder Verankerung im entgegengesetzten Stromband liegen, wird der Einfluß dieser Schicht auf den oberen

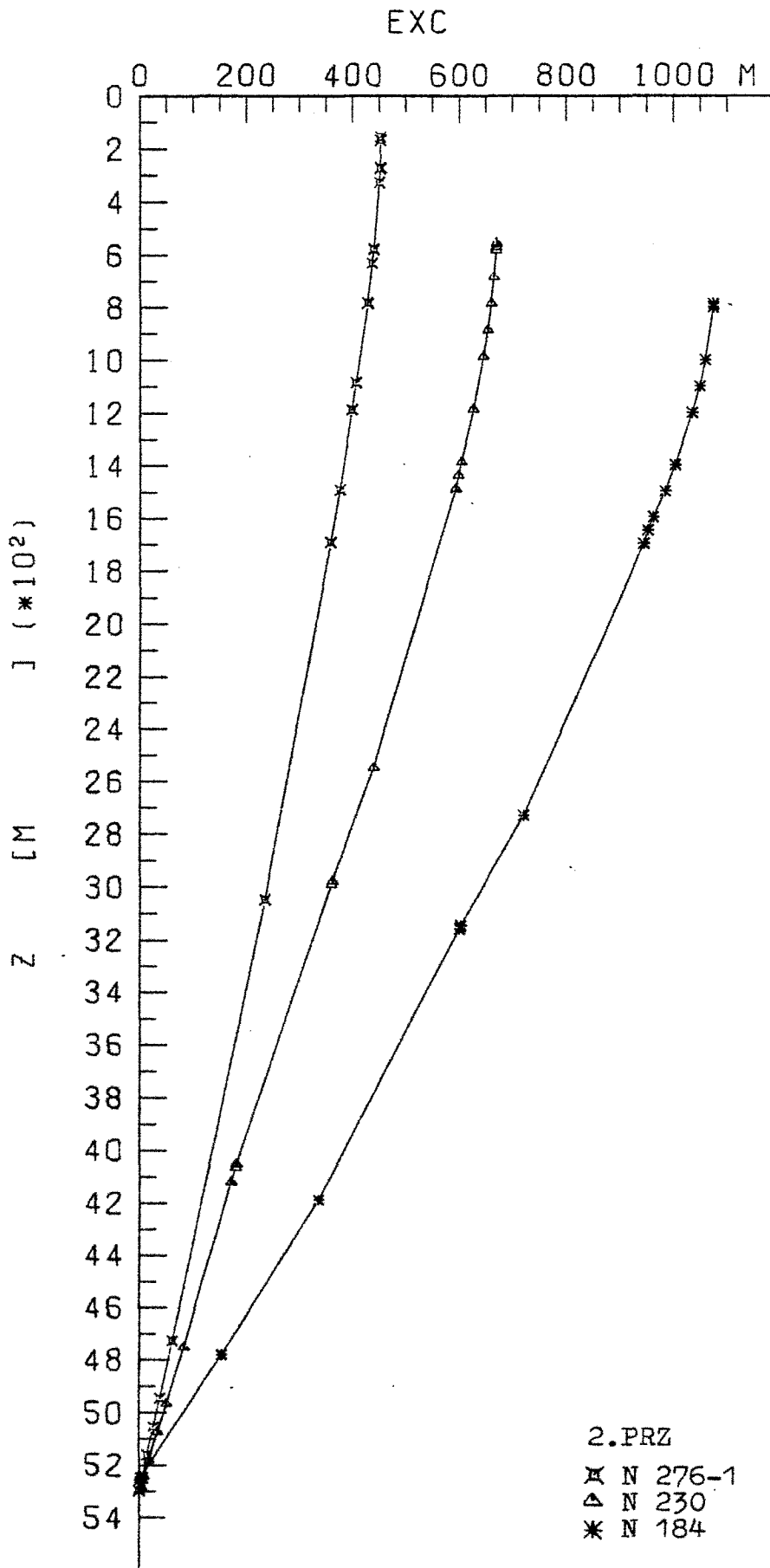


Bild 43: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 2.PRZ (Auslenkung vom Anker)

Teil der Verankerung beschränkt sein, was allerdings nur die räumliche Struktur der Verankerung betrifft. Deutlich sind in Bild 44 die Knickpunkte in der Seilneigung bei N 184 und N 230 zu sehen, während in der sehr viel strafferen Verankerung N 276-1 diese Richtungsänderung nicht so stark ausgeprägt ist. Betrachtet man dagegen die Absolutbeträge der Auslenkungen und vergleicht sie mit den Werten aus 2. KON, so fällt auf, daß diese sich um einen erheblichen Teil verringern. Um einen besseren Vergleich unterschiedlicher Stromprofile zu ermöglichen, wurde die in Teil 10.2 gezeigte Darstellungsweise gewählt.

Die folgende Tabelle 10 soll einen Überblick über die Tiefenlage und die horizontale Auslenkung der Verankerungen N 184, N 230 und N 276-1 für alle sechs Stromanordnungen verschaffen. Am rechten Rand sind die Instrumentennummern angegeben, wobei 101 das oberste Meßinstrument, 102 das zweite Gerät usw. ist. Am oberen Rand sind die Abkürzungen der jeweiligen Stromlagen aufgetragen unterteilt jeweils in zwei Spalten, in denen die Tiefenlagen (Z) und die Horizontalablenkungen (EXC) der Komponenten angegeben sind. Zum Vergleich ist zusätzlich die Ruhelage im stromlosen Fall angegeben.

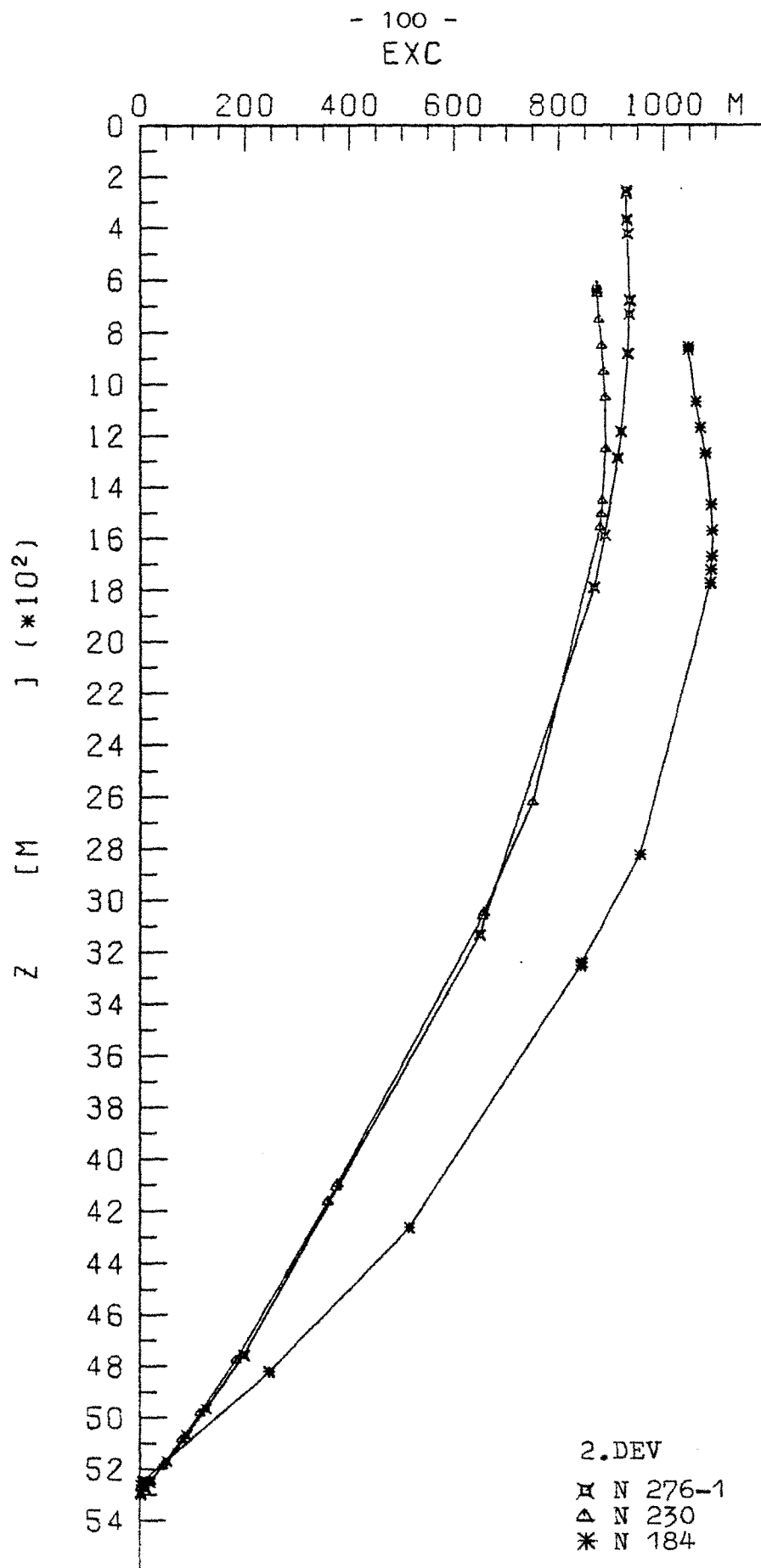


Bild 44: NEADS-Verankerungen im vereinfachten Stromprofil 2.DEV (Auslenkung vom Anker)

Null- strom	2. LIN		3. LIN		2. KON		2. PRO		2. PRZ		2. DEV	
	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC
N 184	649	717	766	1508	1036	1686	660	304	786	1075	855	1048
	662	731	765	1507	1049	1685	673	304	800	1075	869	1048
	1571	1634	673	1321	1946	1549	1581	268	1698	946	1775	1091
	3074	3114	415	816	3368	1075	3081	174	3160	601	3254	843
	4760	4770	100	197	4855	293	4762	45	4784	153	4825	247
N 230	504	543	588	1218	701	1257	510	237	554	670	620	873
	534	573	588	1217	732	1256	540	237	584	670	650	874
	1442	1479	526	1087	1635	1172	1448	211	1489	593	1558	880
	2964	2986	315	652	3110	807	2968	132	2992	360	3061	657
	4052	4062	153	318	4135	444	4054	68	4065	180	4111	375
N 2761	135	177	627	1301	308	1187	146	315	157	453	255	929
	149	191	627	1301	321	1187	159	315	170	453	268	929
	254	296	626	1298	426	1185	264	314	275	452	373	931
	559	601	615	1275	732	1173	570	306	580	440	678	936
	766	808	603	1249	938	1159	776	298	787	428	885	933
	1069	1110	579	1199	1240	1129	1079	284	1089	407	1188	920
	1172	1212	570	1180	1342	1117	1182	280	1191	399	1290	914
	1675	1713	518	1071	1840	1046	1684	253	1693	359	1792	867

Tabelle 7 : Tiefen der Instrumente und Horizontalabweichung aus der Ruhelage für die Verankerungen N 184, N 230, N 276-1 in vereinfachten Stromprofilen

10.2 Einfluß verschiedener Stromprofile auf die Verankerungen N 184, N 230, N 276-1 und J 226

Zur besseren Übersicht sind hier alle gerechneten Stromprofile für jede Verankerung in eine Darstellung gebracht, um ihre Auswirkung auf das Verankerungsseil abschätzen zu können (Bild 45, 46, 47).

Die Zeichenerklärung in der rechten unteren Ecke der Bilder gibt die Abkürzungen der Stromprofile an.

Es fällt auf, daß N 184 und N 230, abgesehen vom größeren Wertebereich bei N 184, in etwa gleich auf jedes Stromprofil reagieren. Einen etwas größeren Einfluß rufen die Profile bei N 276-1 hervor, die durch ihre Charakteristiken den Einfluß der größeren Länge dieser Verankerung stärker hervorheben. Dieses sind, wie oben beschrieben, vor allen Dingen Profil 1 (2., 3. LIN) und Profil 3 (2. PRO und 2. PRZ).

10.3 Abtauchverhalten der Verankerung J 226 in unterschiedlichen Stromprofilen

Auf Grund der unterschiedlichen Seilart und Seillänge muß J 226 getrennt betrachtet werden. Wegen fehlender Vergleiche wurde die Anzahl der untersuchten Profile auf zehn erweitert, um auch so eine möglichst gute Auswertung zu bekommen. Dabei wurden die in Bild 38 gezeigten 4 Grundtypen beibehalten. Grundsätzlich gilt für alle Stromprofile, daß sehr viel größere Stromgeschwindigkeiten und Stromscherungen nö-

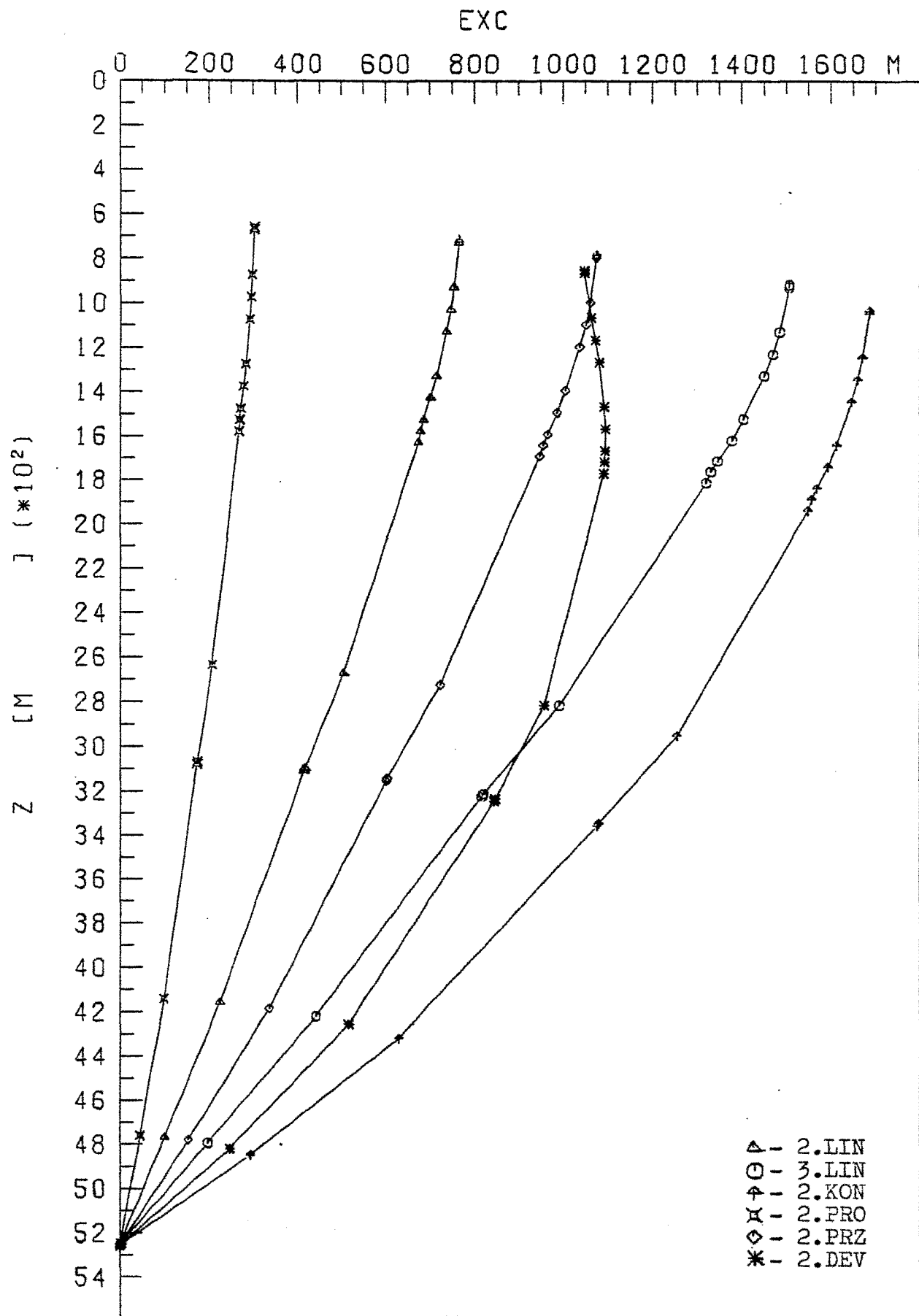


Bild 45: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung N 184 für alle vereinfachten
Stromprofile

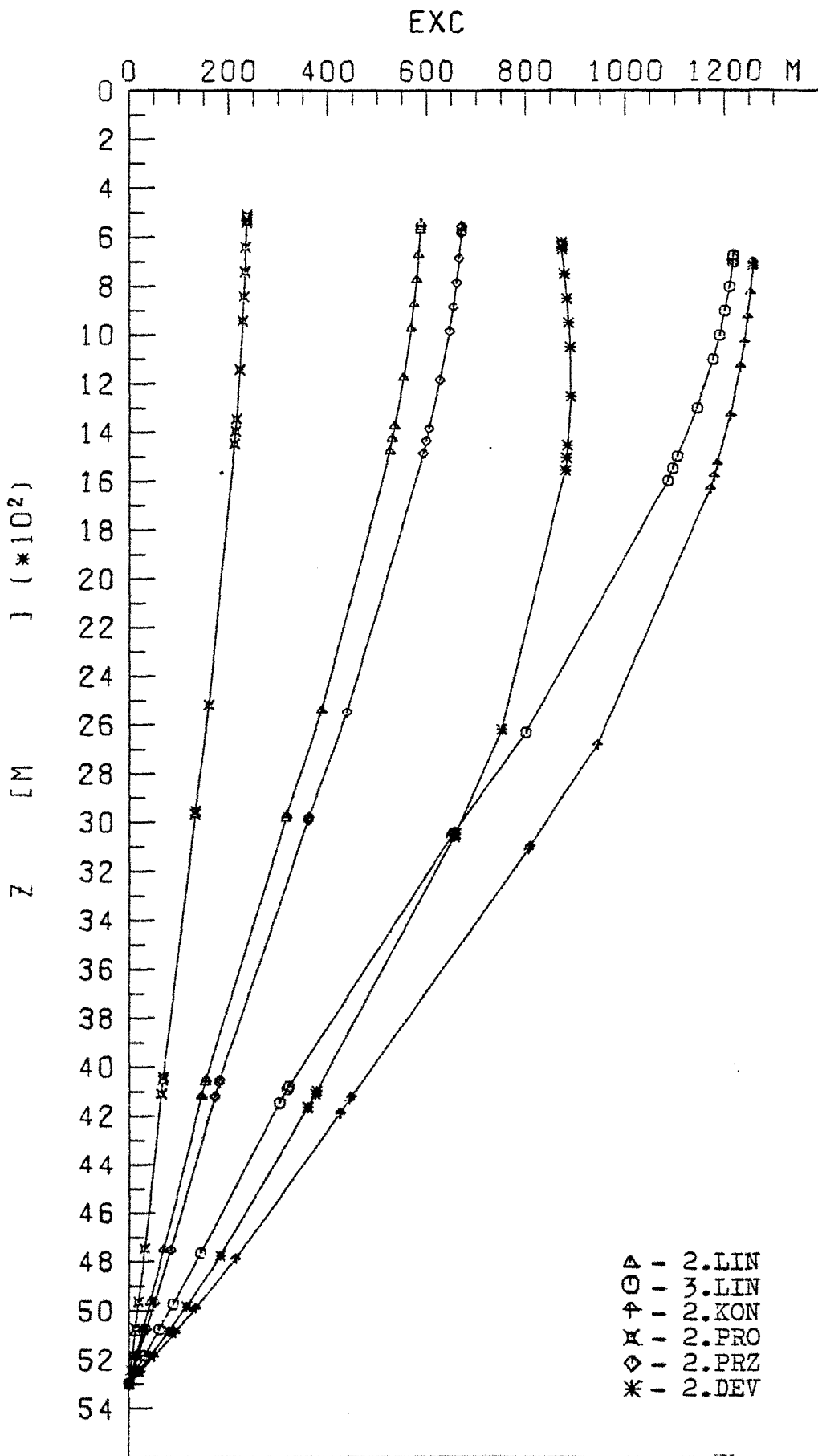


Bild 46: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung N 230 für alle vereinfachten
Stromprofile

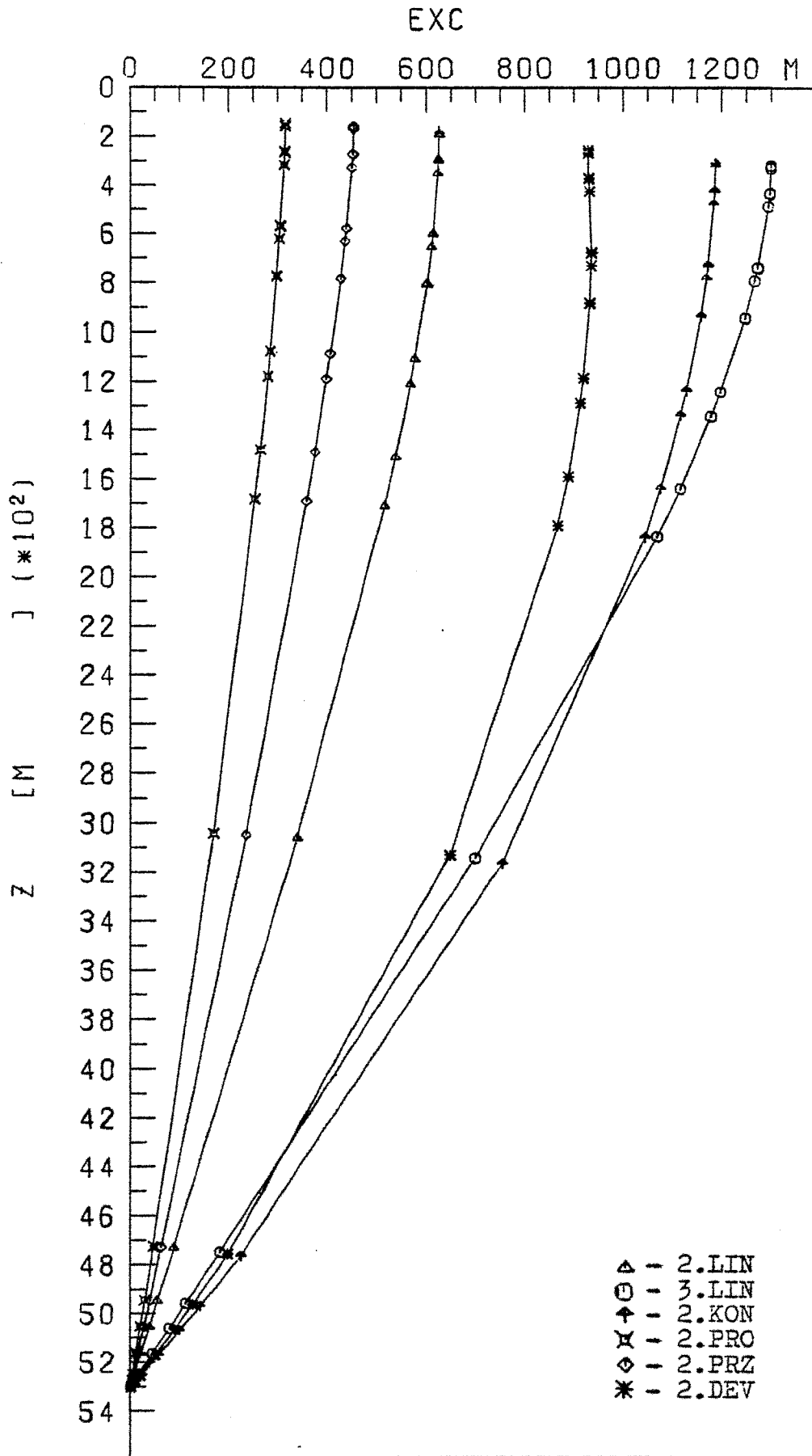


Bild 47: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung N 276-1 für alle vereinfachten
Stromprofile

tig sind, um vergleichbare Auslenkungen wie bei den NEADS-Verankerungen zu erhalten. Mit vergleichbaren Auslenkungen sind horizontale Verschiebungen von $\approx 1/5$ Seillänge gemeint. Dieses Verhalten erklärt sich aus der hohen Zugkraft im Seil und dem höheren Gewicht pro Meter bei etwas kleinerer Anströmfläche des Drahtseils. Durch das 3700 m kürzere Seil reduziert sich die Gesamtfläche der Verankerung auf etwa 24 m^2 gegenüber 70 m^2 der Tiefseeverankerungen, wodurch die Widerstandskräfte erheblich kleinere Werte annehmen.

a) Stromprofil 1 mit 20 cm/s und 30 cm/s Oberflächenstrom
(Abkürzungen 2. LIN und 3. LIN)

Bei diesen linear abnehmenden Stromprofilen zeigen sich im ersten Fall Abweichungen von 84 m der obersten Komponente, die sich auf 185 m vergrößern bei Erhöhung der Stromgeschwindigkeit auf das $1 \frac{1}{2}$ fache. Man sieht auch hier eine deutliche Zunahme der Horizontalverschiebung bei relativ geringer Geschwindigkeitserhöhung des Oberflächenwassers.

b) Stromprofil 1 mit 50 cm/s und 70 cm/s Oberflächenstrom
(Abkürzungen 5. LIN und 7. LIN)

Zur Unterstreichung des oben gesagten wurden noch diese beiden Extremfälle berechnet und in Bild 48 dargestellt. Die Abtauchtiefe erhöht sich im letzten Fall auf 190 m, was bei einer Verankerung dieser Länge schon ein sehr großer Wert ist.

Realistischer ist dagegen das Verhalten bei 50 cm/s Oberflächenstrom, das eine Tiefenänderung der obersten Kompo-

nente von 76 m ergibt. Diese Werte wurden während des JASIN-Experiments 1978 durchaus erreicht, wie auch das nächste Kapitel zeigen wird.

c) Stromprofil 2 mit 20 cm/s konstantem Strom über die gesamte Wassersäule (Abkürzung 2. KON)

Ähnlich wie die oberflächennahe Verankerung N 276-1 wird auch J 226 bei diesem Strombild nicht so stark ausgelenkt wie bei 3. LIN. Auch hier erklärt sich dieses Verhalten durch die Verringerung der Widerstandskraft infolge sinkender Stromgeschwindigkeit im oberen Teil der Verankerung.

d) Stromprofil 3 mit 50 cm/s und Schichtdicken von 50 m und 180 m (Abkürzungen 55. PRO und 5. PRZ)

Der Vergleich beider Profile zeigt den Einfluß der Lage der Scherungszone bezüglich des Verankerungsseils bei gleicher Stromstärke in der Oberflächenschicht. Bei 55. PRO befindet sie sich direkt oberhalb des obersten Auftriebskörpers, während sie bei 5. PRZ innerhalb der obersten 150 m der Leine liegt. Die resultierende Erhöhung der Horizontalablenkung um 150 m zeigt auch hier, wie sensitiv die Verankerung auf Stromgeschwindigkeiten und Stromprofileigenschaften reagiert.

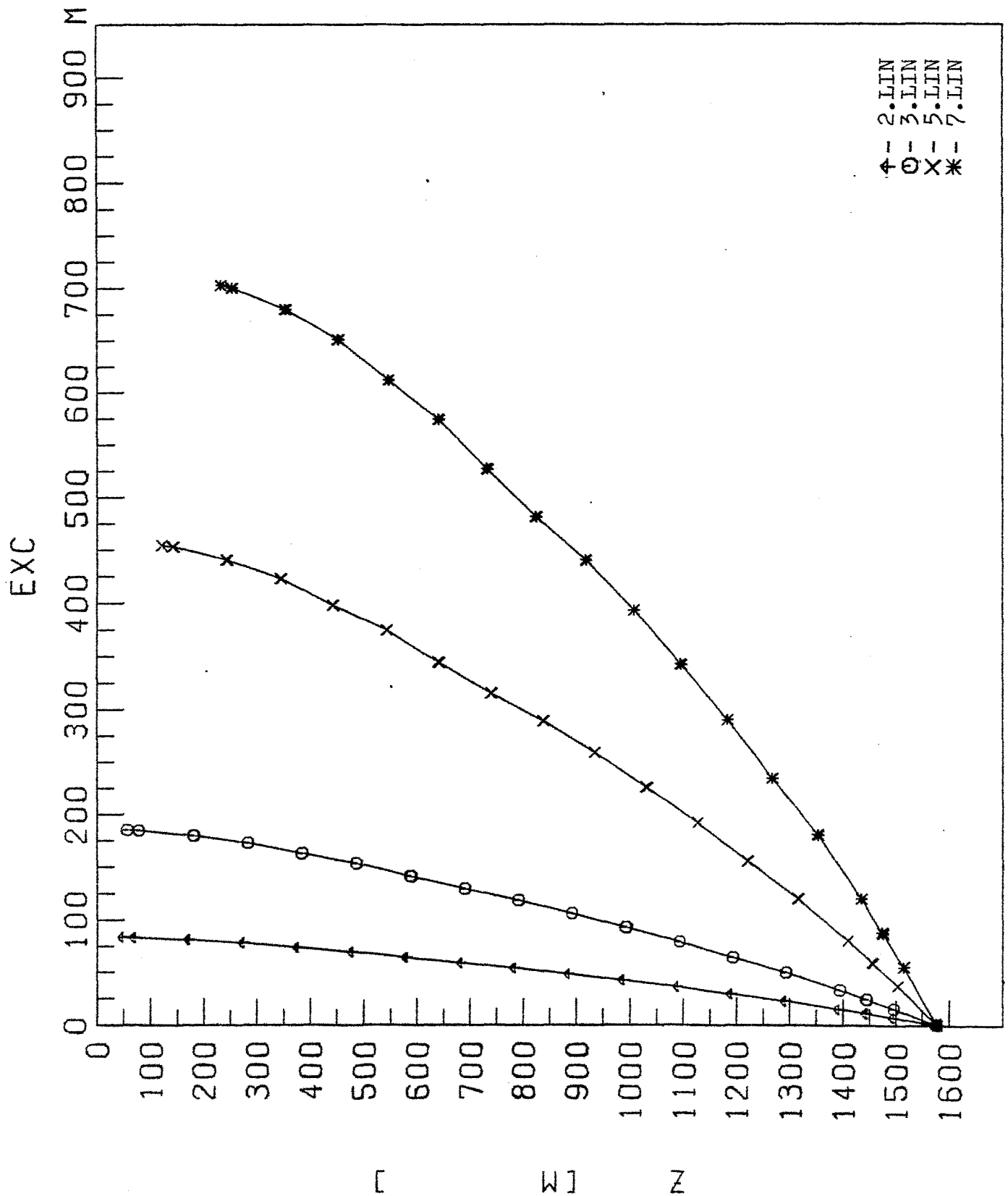


Bild 48: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung J 226 für vier lineare Stromprofile

e) Stromprofil 4 in 3 verschiedenen Variationen

(Abkürzungen 32. DEV, 33. DEV und 5. DEV)

i) 32. DEV:

Konstanter Strom mit 30 cm/s bis in etwa 150 m Tiefe. 70 m mächtige Scherungszone mit Nullstromtiefe in 180 m und unterhalb von 220 m wieder konstanter Strom mit 20 cm/s, jedoch in Gegenrichtung.

ii) 33. DEV:

Bis 220 m Tiefe wie 32. DEV. Bis zum Boden dann aber konstanter Strom mit 30 cm/s ebenso in entgegengesetzter Richtung.

iii) 5. DEV:

Wie 33. DEV, nur mit jeweils 50 cm/s Stromgeschwindigkeit.

Der Vergleich der ebenfalls in Bild 49 dargestellten Kurven zeigt - abgesehen von der großen Differenz der beiden letzten Fälle - einen deutlichen Unterschied zwischen 32. DEV und 33. DEV.

Während die Auslenkung im ersten Profil nur etwa 20 m im oberen Teil beträgt - in 700 m Tiefe sind es etwa 50 m - vergrößert sich dieser Wert bei 33. DEV auf immerhin 170 m oben und 190 m in 500 m Tiefe. Die Kurvenform bleibt dabei erhalten.

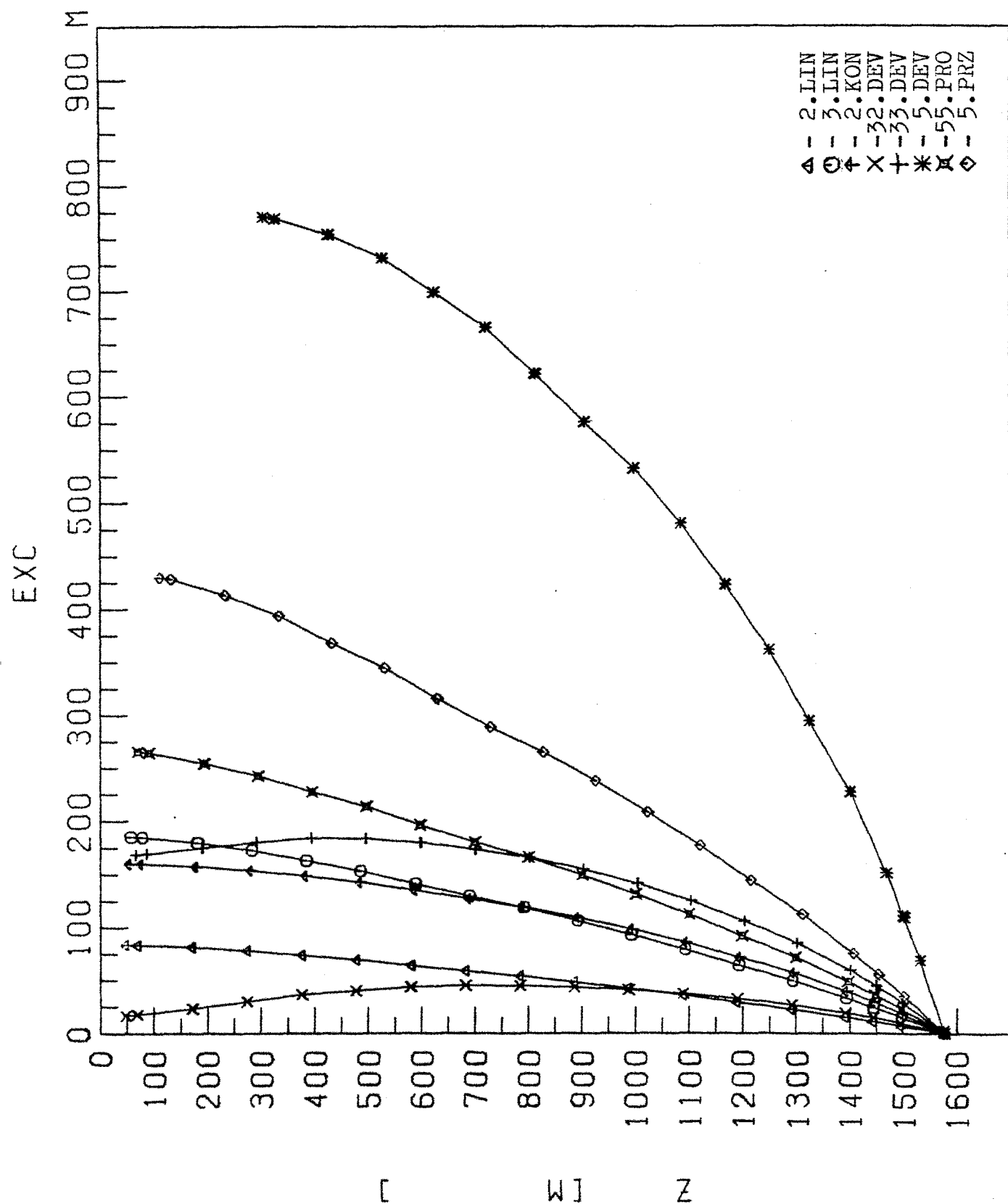


Bild 49: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung J 226 für alle vereinfachten
Stromprofile

Ein anderes Aussehen erhält die Kurve bei 5. DEV, weil durch den starken Strom in der Unterschicht die Verankerung unter die Nullstromtiefe abtaucht und dadurch nur Anströmung aus einer Richtung erfährt. Dieser stärkere Unterstrom ist auch für die größeren Horizontalbewegungen im Falle 33. DEV gegenüber 32. DEV verantwortlich.

Tabelle 8 soll die Zahlenwerte aller Rechnungen für die Verankerung J 226 zusammenfassen.

Null- strom	2. LIN		3. LIN		5. LIN		7. LIN		2. KON		1. Komp.
	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	
45	47	84	57	185	121	455	233	703	56	160	1. Komp.
67	70	84	80	185	143	453	255	700	78	160	101
171	173	81	183	180	246	440	357	679	182	157	102
273	275	78	285	173	346	423	455	651	283	154	103
476	477	69	488	153	544	374	643	574	487	143	104
580	582	64	590	141	643	344	735	527	590	135	105
784	786	54	793	119	839	289	920	440	793	119	106
987	989	42	994	93	1032	225	1098	342	996	98	107
1291	1291	22	1295	50	1317	120	1354	180	1296	57	108

J 226

Tabelle 8 Bl.1: Tiefen der Instrumente und Horizontalabweichung aus der Ruhelage für die Verankerung J 226 in vereinfachten Stromprofilen

	Null- strom	55. PRO		5. PRZ		32. DEV		33. DEV		5. DEV		1. Komp.
		Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	Z	EXC	
	45	70	266	111	430	47	17	66	169	306	771	1. Komp.
	67	92	264	133	428	70	18	88	169	328	769	101
	171	195	254	236	413	173	23	191	175	431	753	102
	273	296	243	336	393	275	30	293	181	530	731	103
J. 226	476	498	213	534	344	478	40	497	184	723	665	104
	580	600	196	633	315	582	43	600	180	816	621	105
	784	802	165	830	264	785	44	804	165	1000	532	106
	987	1002	131	1025	207	989	41	1005	141	1171	422	107
	1291	1300	71	1313	112	1292	27	1304	85	1402	226	108

Tabelle 8 Bl.2: Tiefen der Instrumente und Horizontalabweichung aus der Ruhelage für die Verankerung J 226 in vereinfachten Stromprofilen

11. Vergleich der Verankerungsbewegungen mit gemittelten aktuellen Stromdaten

11.1 Auswahl der Meßdaten

Die im Institut für Meereskunde Kiel verwendeten Aanderaa-Strommesser haben beim Einsatz in Langzeitverankerung eine Abfragerate von einer Stunde, in der der momentane Betrag der Stromgeschwindigkeit und die momentare Richtung der Strömung auf Magnetband gespeichert werden (Dietrich et al., 1975). Aus diesen Daten ergeben sich Zeitreihen für die Stromstärke und die Stromrichtung relativ zu magnetisch Nord. Mit Hilfe der zusätzlich am Gerät befindlichen Sensoren ergeben sich Temperatur-, Druck- und (oder) Salzgehaltswerte, die mit gleicher Periodizität aufgezeichnet werden. Für die vorliegende Arbeit wurden nur Stromgeschwindigkeit, Stromrichtung und Druckregistrierung ausgewertet. Aus den vorliegenden Zeitreihen wurden dann Bereiche mit geringer und möglichst großer Aktivität ausgewählt. Sie dienen zum einen dazu, die Minimaltiefen der jeweiligen Instrumente festzulegen und, bei starker Aktivität, die Bereiche großen Abtauchens der Verankerung zu kennzeichnen. Dann wurden für diese Bereiche die Rohdaten mit einem Lanczos-Filter gefiltert und stündliche sowie tägliche Mittel gebildet. Die so geglätteten Daten wurden nun als Zeitreihen geplottet. Die Bilder 50 bis 72 geben die ausgewählten Bereiche der zu untersuchenden Verankerungen wieder. Dabei wurde auf die Darstellung der Stromrichtung verzichtet. Aus diesen aufbereiteten Daten wurden nun für markante Tage die Stromdaten

für das Stromprofil des Rechenprogramms übernommen, um mit seiner Hilfe die Verankerungskonfiguration zu diesem Zeitpunkt zu rekonstruieren. Anhand der errechneten Instrumententiefen konnten nun die auf Tiefenmeter umgerechneten Druckregistrierungen verglichen werden. Als Schwierigkeit erwies sich dabei, daß die Verankerungen N 184 und N 230 nur 4 Strommesser und jeweils nur einen Drucksensor enthielten. Dadurch war bei einer Wassertiefe von über 5000 m eine genaue Angabe des tatsächlichen Stromprofils nur bedingt möglich. Außerdem mußte hier der Genauigkeit des einen Drucksensors voll vertraut werden.

Bei Verankerung N 276-1 wurden zusätzlich die durch den Neigungsmesser N 62 in etwa 700 m Tiefe gespeicherten Vertikalwinkel des Verankerungsseils ausgewertet und mit Programmdateien verglichen. Da die vom Programm STASIP errechneten Tiefenwerte Fehler durch ungenaue Reckberechnung - sie tritt bei allen NEADS-Verankerungen auf - Gewichtsungenauigkeiten und anderes enthalten, wurde der Begriff der errechneten Solltiefe eingeführt. Diese soll die oben genannten Fehler eliminieren und damit die Tiefendifferenz zwischen wahrer und errechneter Verankerungskonfiguration auf Unterschiede im angenäherten Stromprofil zum wahren Stromprofil zurückführen. Voraussetzung dabei ist, daß trotz unterschiedlicher Tiefen die Abtauchrate beider Verankerungen gleich groß ist.

Dieses ist zumindest für den oberen Teil der Verankerung gegeben wegen des dort sehr geringen Neigungswinkels θ der Komponenten.

Die errechnete Solltiefe Z_s erhält man durch

$$Z_{s1} \approx Z_{w1} + |\Delta Z_{wpo}| \approx Z_{po} + |\Delta Z_{R1}|$$

mit $\Delta Z_{wpo} = Z_{w0} - Z_{po}$ und $\Delta Z_{R1} = Z_{w1} - Z_{w0}$

Z_{w0} = wahre Tiefe bei Nullstrom

Z_{po} = errechnete Tiefe bei Nullstrom

Z_{s1} = Solltiefe zur Zeit T1

ΔZ_{R1} = Abtauchrate zur Zeit T1

ΔZ_{wpo} = Differenz der Programmtiefe und der
wahren Tiefe bei Nullstrom

Z_{w1} = wahre Tiefe zur Zeit T1

Ein Maß für die Genauigkeit der Berechnung ist jetzt die Differenz zwischen errechneter Tiefe Z_{pi} und der Solltiefe Z_{si} . Die genäherten Stromprofile wurden bei den NEADS-Verankerungen so ausgewählt, daß dieser Differenzwert kleiner als 2 Promille der Seillänge ist.

N 184:

Für diese Verankerung wurden drei Zeitbereiche ausgewählt

19.02.77 - 26.02.77 (Bild 50, 51)

04.03.77 - 10.03.77 (Bild 52, 53)

14.06.77 - 21.06.77 (Bild 54, 55)

Anhand der Druckkurven wurden nun als markante Punkte der 24.02., 07.03. und 16.6.77 ausgesucht. Mit den Meßwerten dieser Tage wurden nun die in Tabelle 9 aufgeführten Stromprofile erstellt. Zusätzlich wurde für den 16.6. ein Stromprofil angenähert, das bessere Tiefenwerte lieferte.

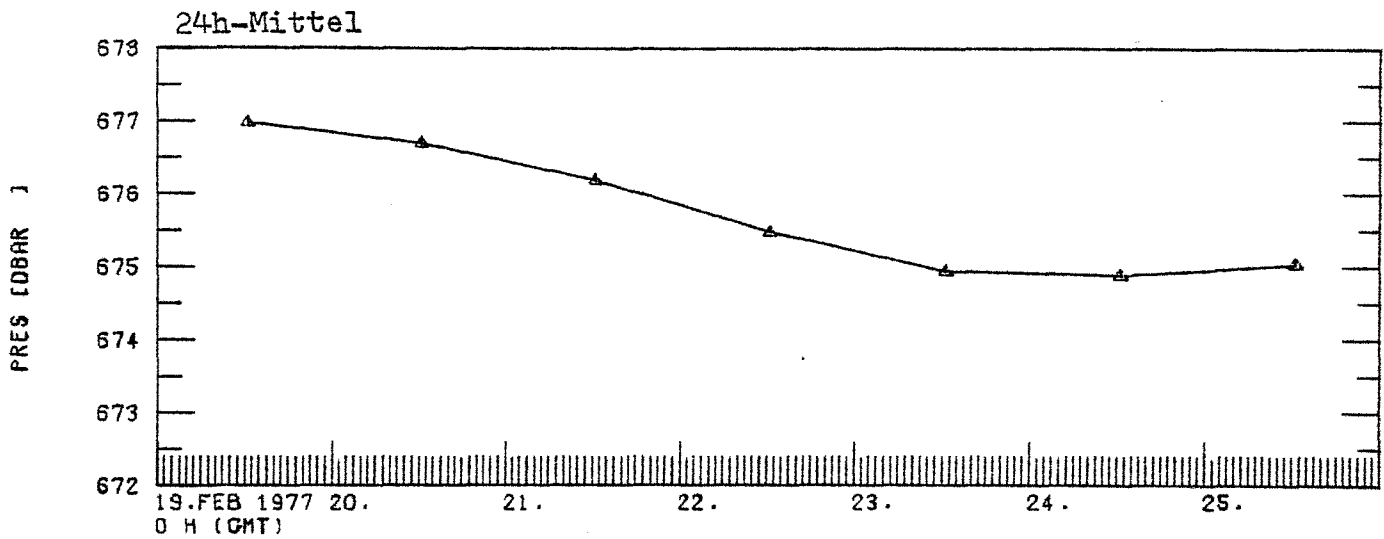


Bild 50: N 184 Druckkurve für Gerät 101(670 m)

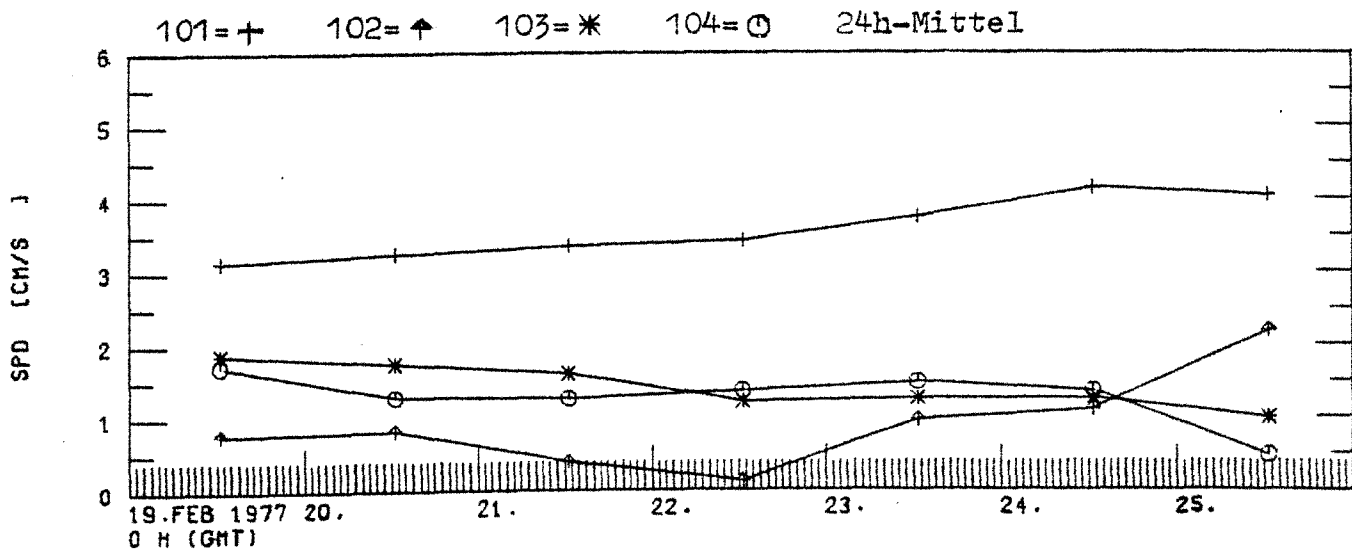


Bild 51: N 184 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(670 m),
102(1585 m), 103(3090 m), 104(4770 m)

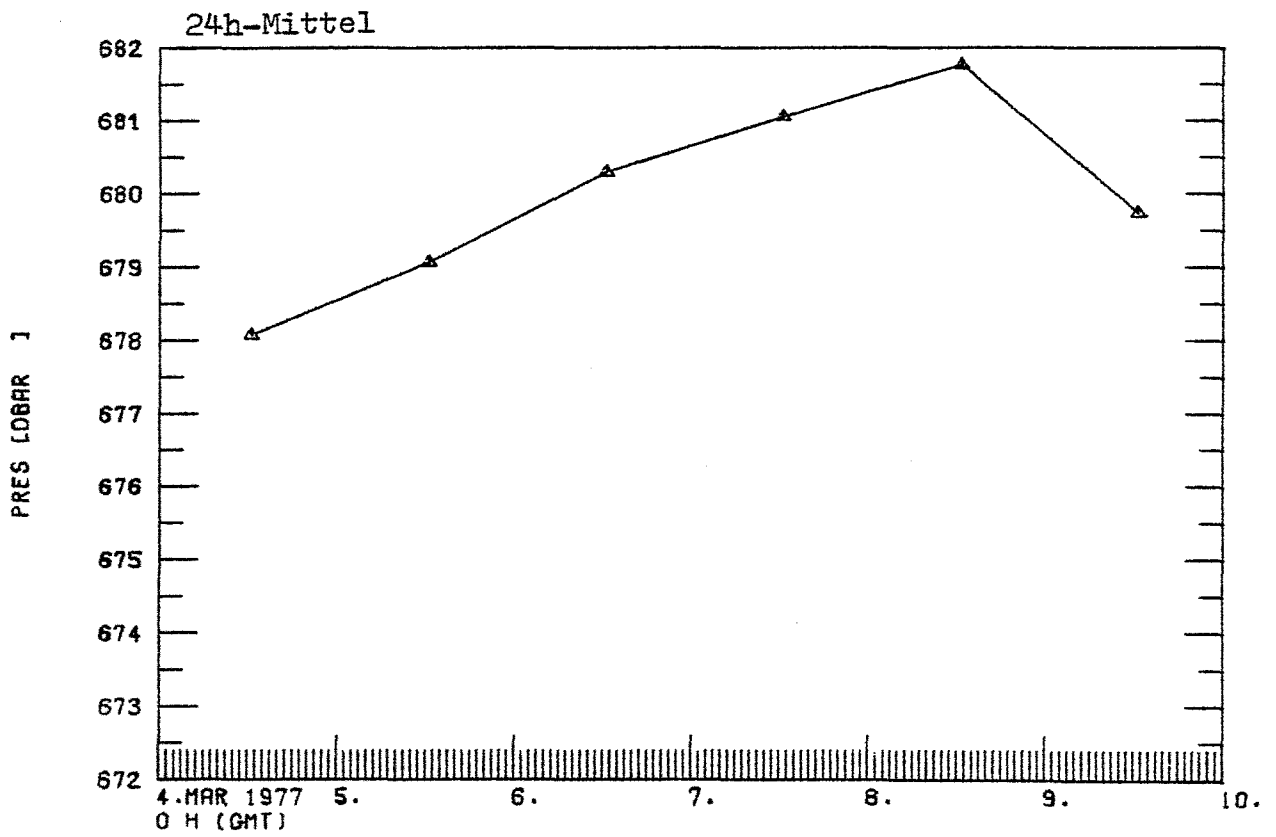


Bild 52: N 184 Druckkurve für Gerät 101(670 m)

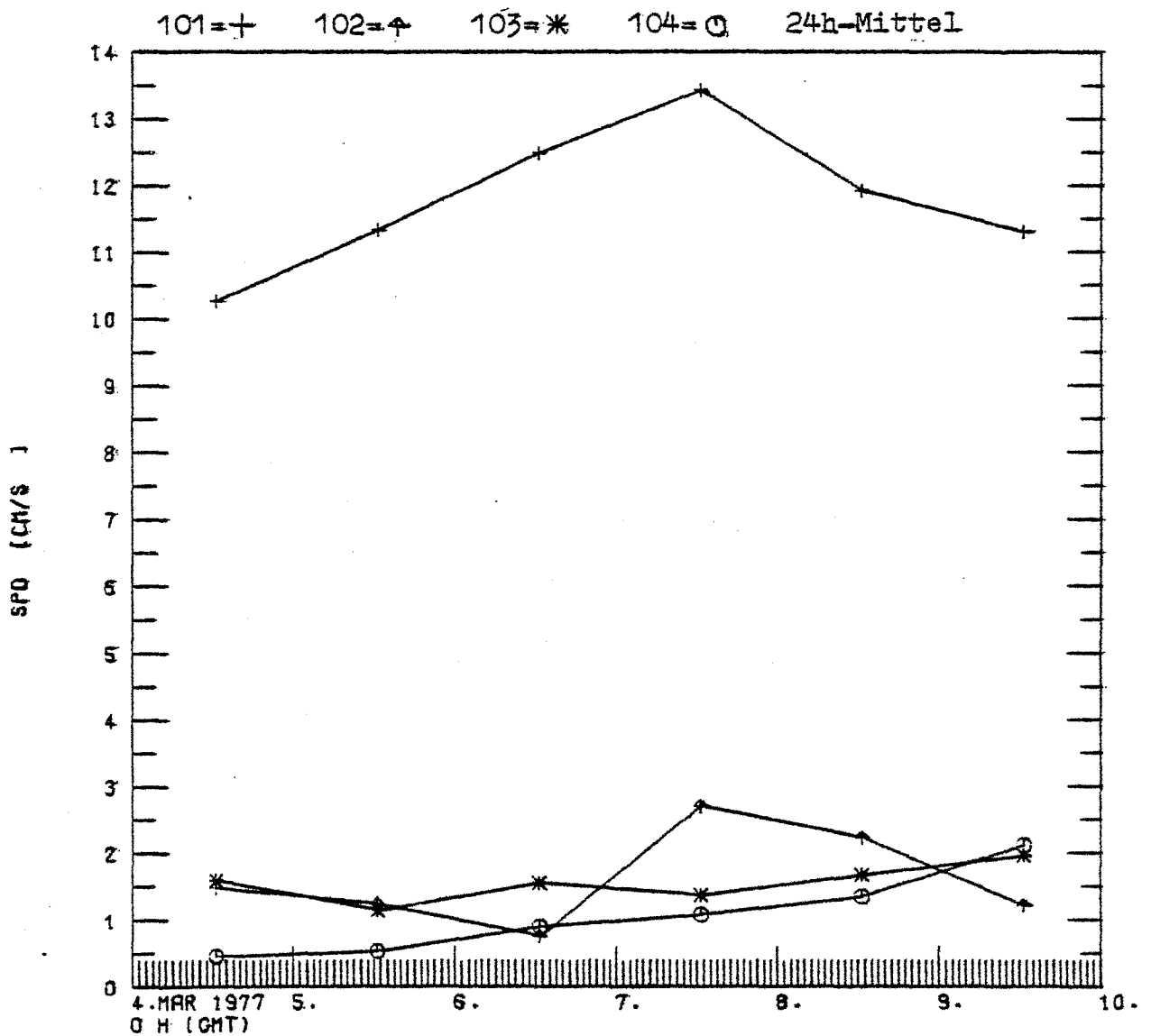


Bild 53: N 184 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(670 m),
102(1585 m), 103(3090 m), 104(4770 m)

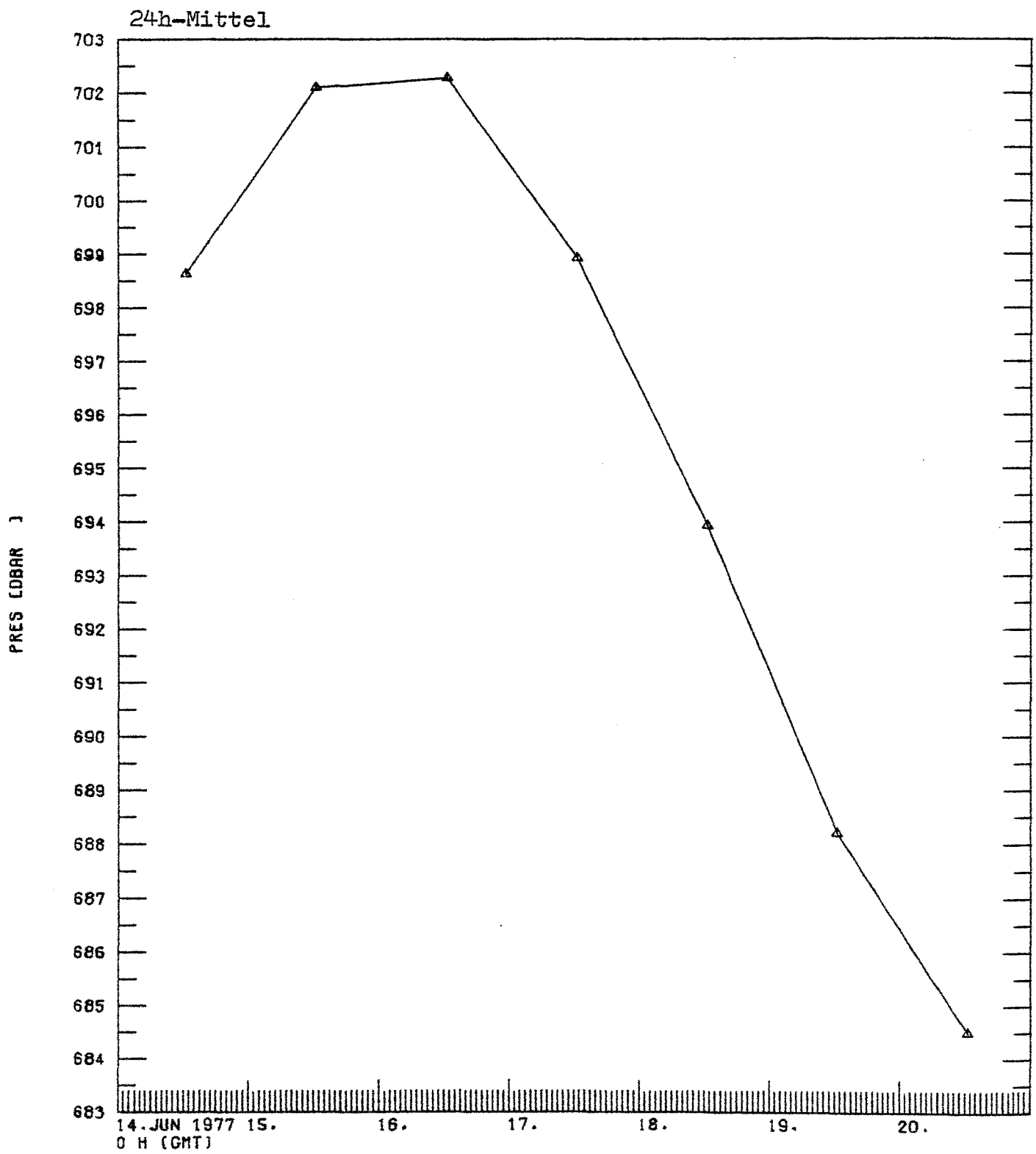


Bild 54: N 184 Druckkurve für Gerät 101(670 m)

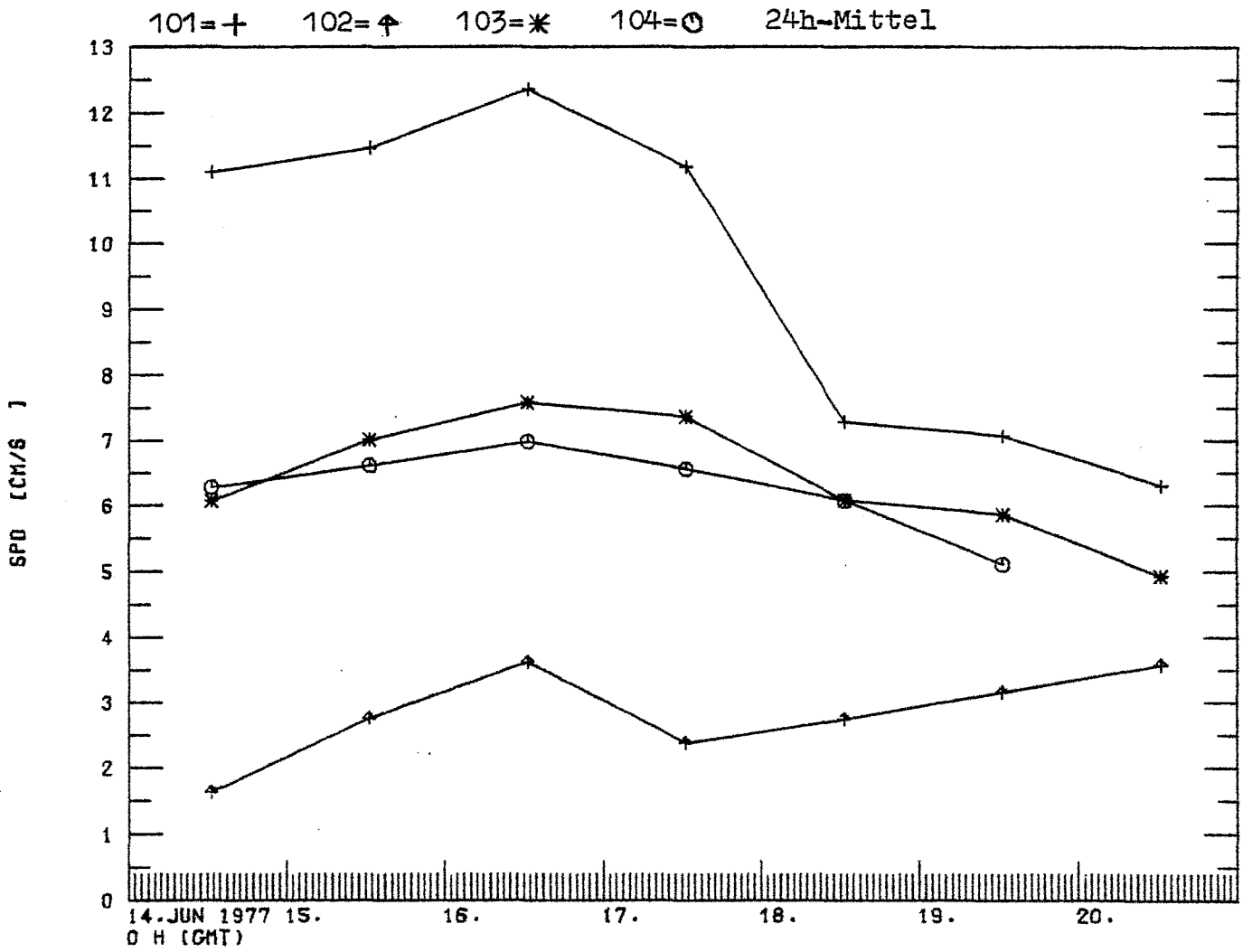


Bild 55: N 184 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(670 m),
102(1585 m), 103(3090 m), 104(4770 m)

N 184

N 184

Datum	Tiefe	Strom geschw.	Strom richtg.	Z_D	Z_S
24.2.77	0	0.098	130	662.3	669
	669.7	0.049	130		
	1585	0.01	240		
	3089	0.012	310		
	4770	0.015	310		
	5260	0.001	310		
07.3.77	0	0.25	105	665.7	668
	675.8	0.135	105		
	1585	0.027	220		
	3089	0.014	220		
	4770	0.011	190		
	5260	0.001	190		
16.6.77	0	0.25	300	665.9	689
	696.8	0.123	300		
	1585	0.036	30		
	3089	0.085	315		
	4770	0.069	315		
	5260	0.001	315		
16.6.77 (neu)	0	0.5	300	682.9	689
	670	0.2	300		
	696	0.123	300		
	1200	0.1	300		
	1585	0.036	30		
	1850	0.070	315		
	3089	0.085	315		
	4770	0.069	315		
	5200	0.06	315		
	5260	0.001	315		

Es bedeuten

Z_o = errechnete Tiefe der Druckmesser

Z_s = errechnete Solltiefe dieser Instrumente

(neu) = verbessertes Stromprofil

Tabelle 9

N 230:

Die Zeitbereiche dieser Verankerung sind

01.10.78 - 05.10.78 (Bild 56, 57)

21.11.78 - 26.11.78 (Bild 58, 59)

Da diese Verankerung über die gesamte Meßdauer nur kleine Schwankungen aufweist, sind nur zwei repräsentative Zeitpunkte ausgewählt und die Verankerung danach berechnet worden. Es sind der 02.10. und der 23.11.78.

Wegen der geringen Auslenkungen der Verankerung waren keine Näherungen der Stromprofile nötig. Tabelle 10 gibt die beiden aktuellen Stromdaten wieder.

Es sind: Z_D = errechnete Tiefen der Druckmesser
 Z_S = errechnete Solltiefe dieser Instrumente

N 230

Datum	Tiefe	Strom geschw.	Strom richtg.	Z_D	Z_S
02.10.78	0	0.02	230	534.1	535
	483.2	0.015	230		
	2945	0.01	350		
	4050	0.007	340		
	5300	0.001	340		
23.11.78	0	0.30	210	536.1	540
	489.9	0.094	210		
	2945	0.029	240		
	4050	0.006	210		
	5300	0.001	210		

Tabelle 10

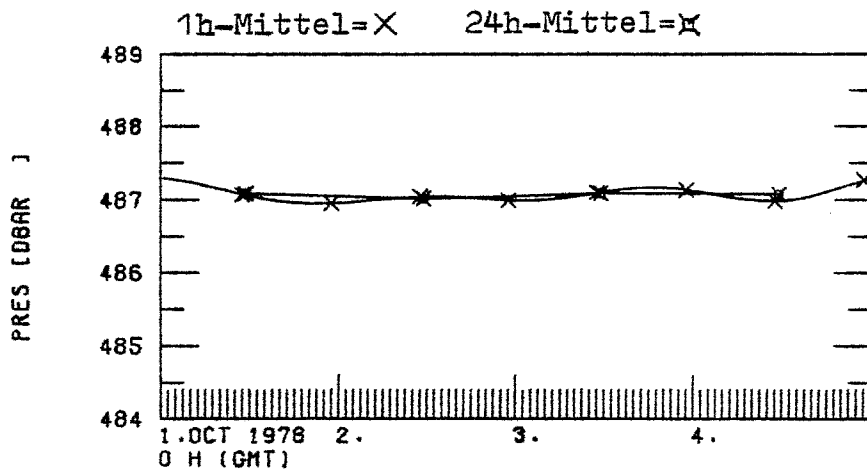


Bild 56: N 230 Druckkurve für Gerät 101(485 m)

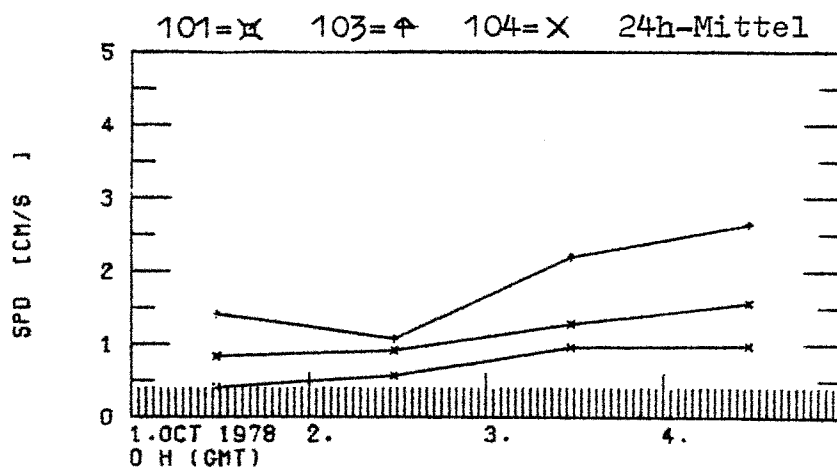


Bild 57: N 230 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(485 m),
103(2945 m), 104(4050 m)

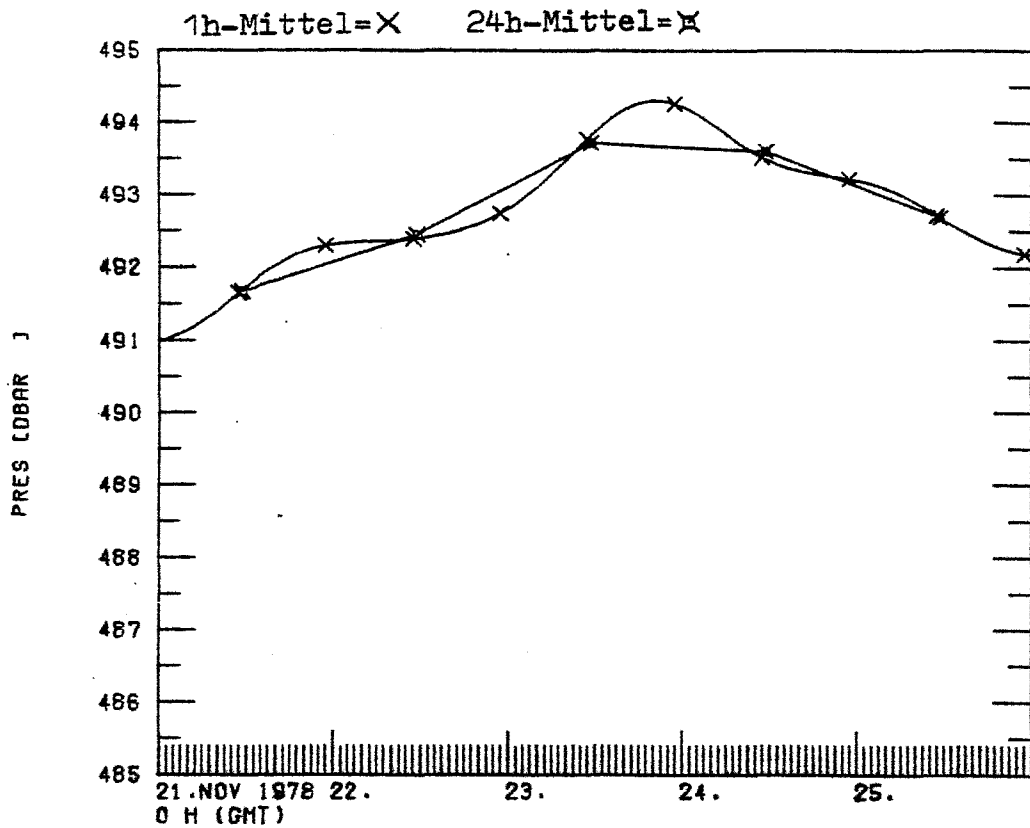


Bild 58: N 230 Druckkurve für Gerät 101(485 m)

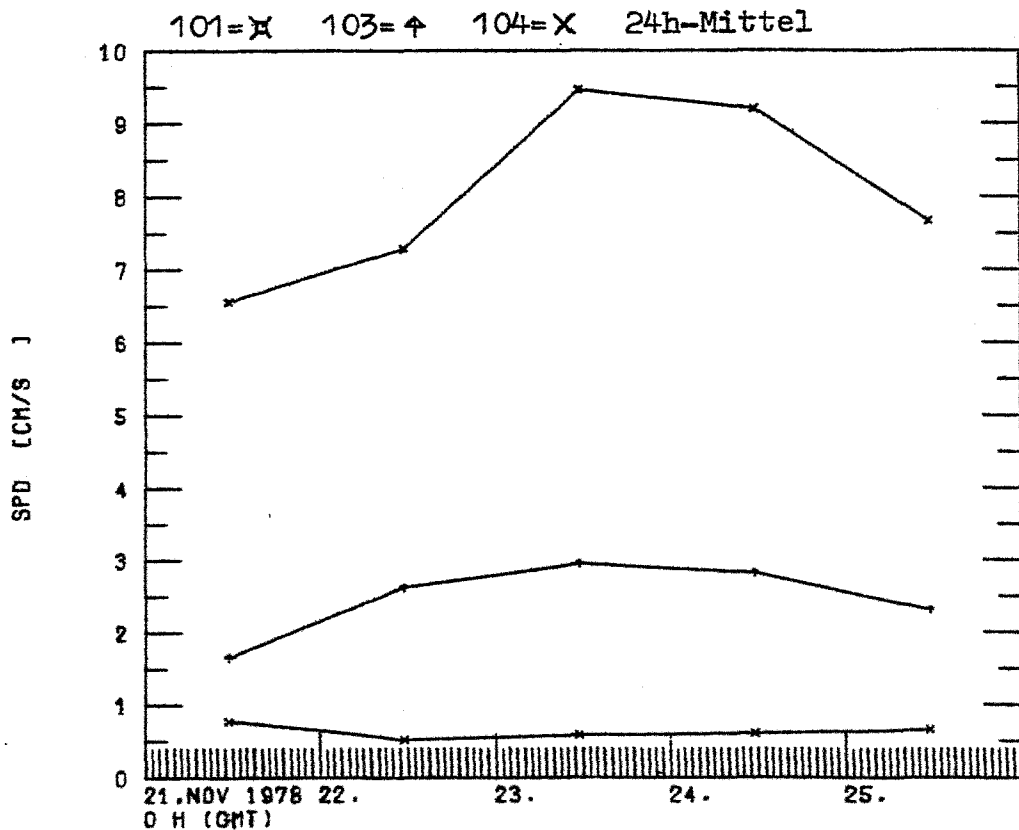


Bild 59: N 230 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(485 m),
103(2945 m), 104(4050 m)

N 276-1:

In den Zeitintervallen

17.12.80 - 24.12.80 (Bild 60-64)

05.06.81 - 12.06.81 (Bild 65-68)

wurde jeweils für zwei Tage die Verankerungsanordnung mit den gemessenen Stromdaten nachgerechnet. Es sind dieses der 19.12. und 22.12.80 sowie der 07.06. und 09.06.81.

Da es sich bei allen Tagen um Zeitpunkte großer Aktivität handelt, wurde die Ruhelage durch die Anordnung am 31.12.80 bestimmt. Sie weist die niedrigsten Druckwerte während des gesamten Meßzeitraums auf, hat aber immer noch eine Horizontalauslenkung von 68 m, was auf eine Abweichung vom Sollwert hinweist. Für das Zeitintervall im Dezember 1980 lagen außerdem die Neigungswinkel zur Vertikalen aus etwa 700 m Tiefe vor, die in Bild 63 dargestellt sind.

In Tabelle 11 sind die benutzten Stromprofile angegeben.

Dabei bedeutet

Z_D = errechnete Tiefe der Druckmesser

Z_S = errechnete Solltiefe dieser Instrumente

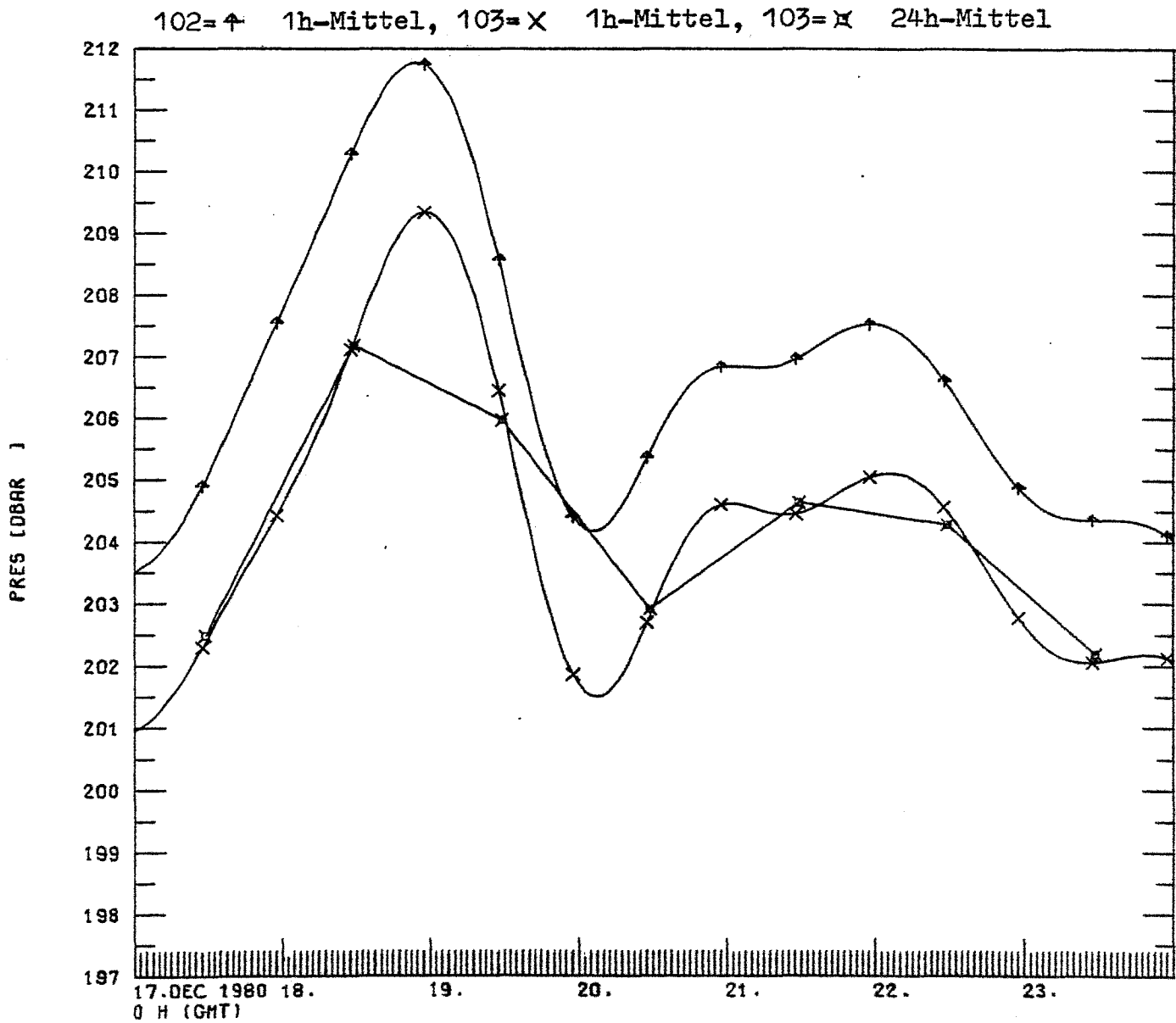


Bild 60: N 276-1 Druckkurven der Geräte 102(198 m), 103(200 m)

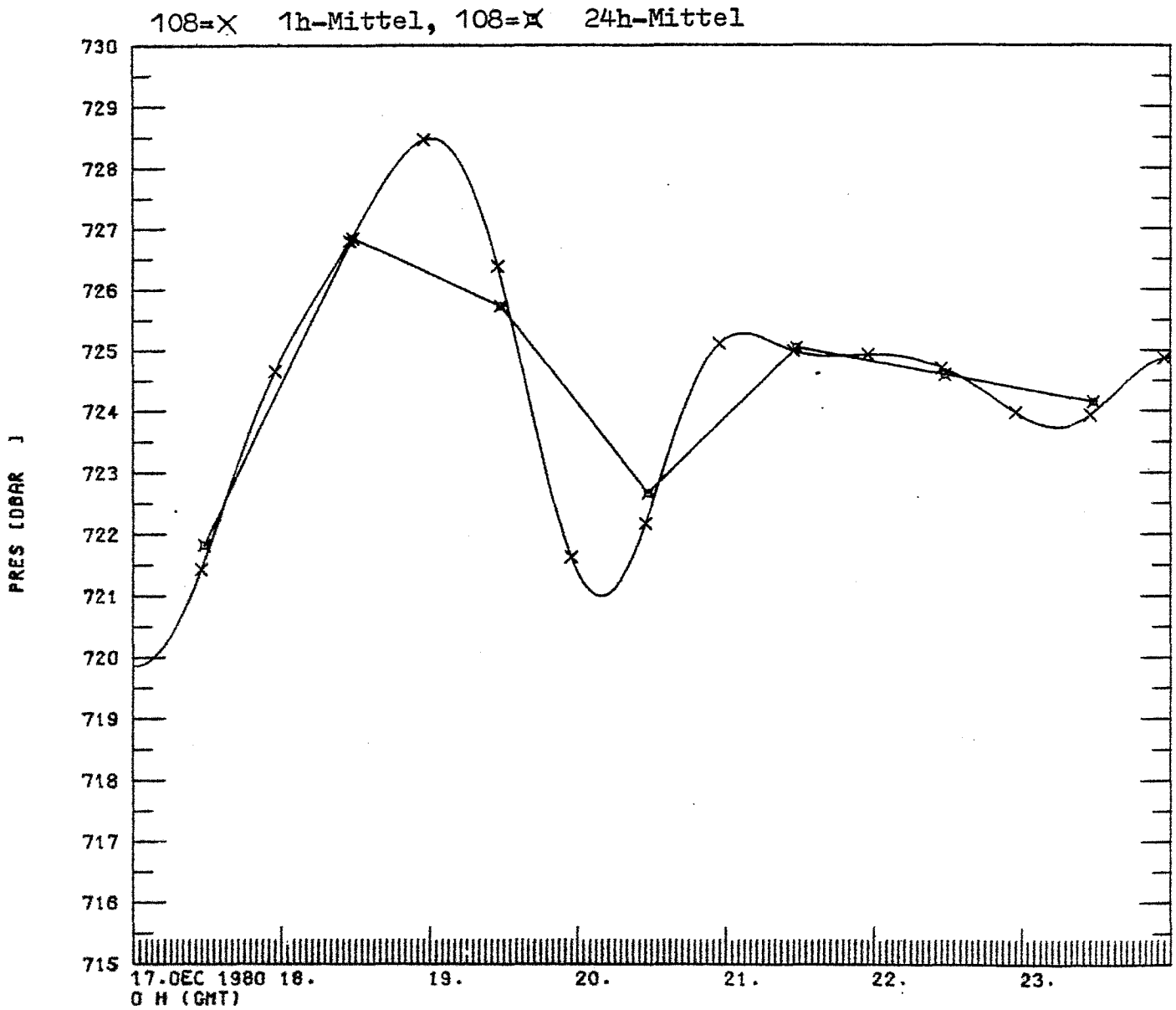


Bild 61: N 276-1 Druckkurve für Gerät 108(700 m)

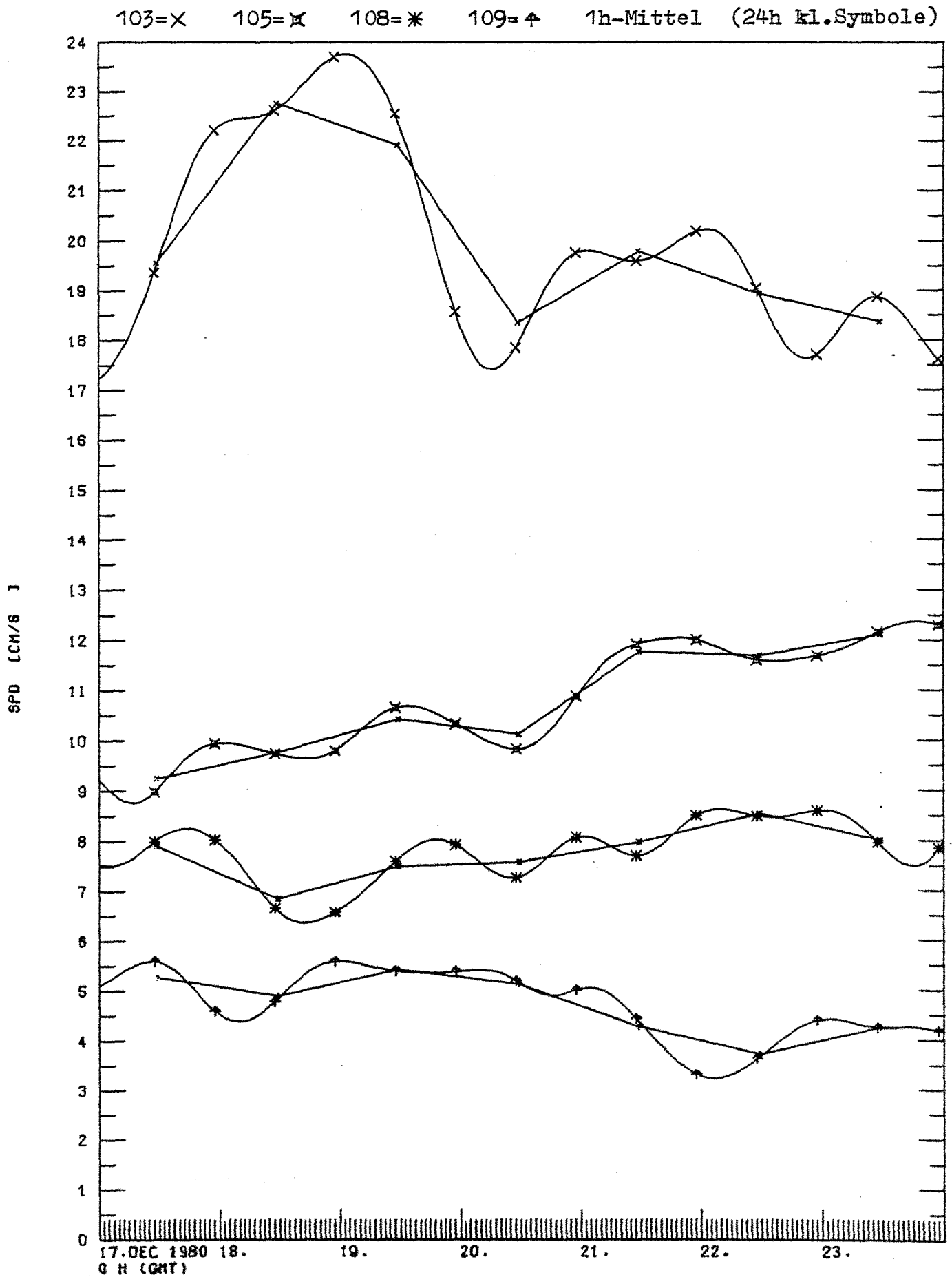


Bild 62: N 276-1 Stromgeschwindigkeit der Geräte 103(200 m),
105(500 m),108(700 m),109(1000 m)

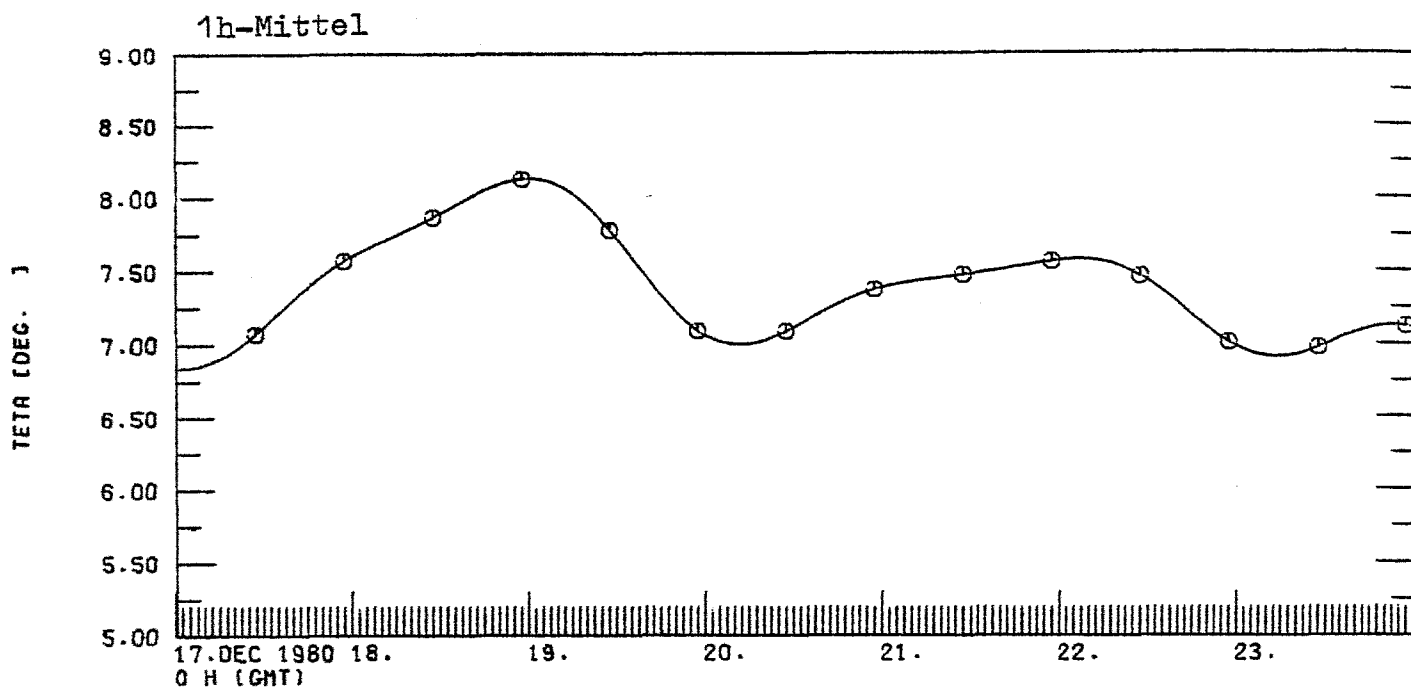


Bild 63: N 276-1 Neigungswinkel des Gerätes 107(700 m)

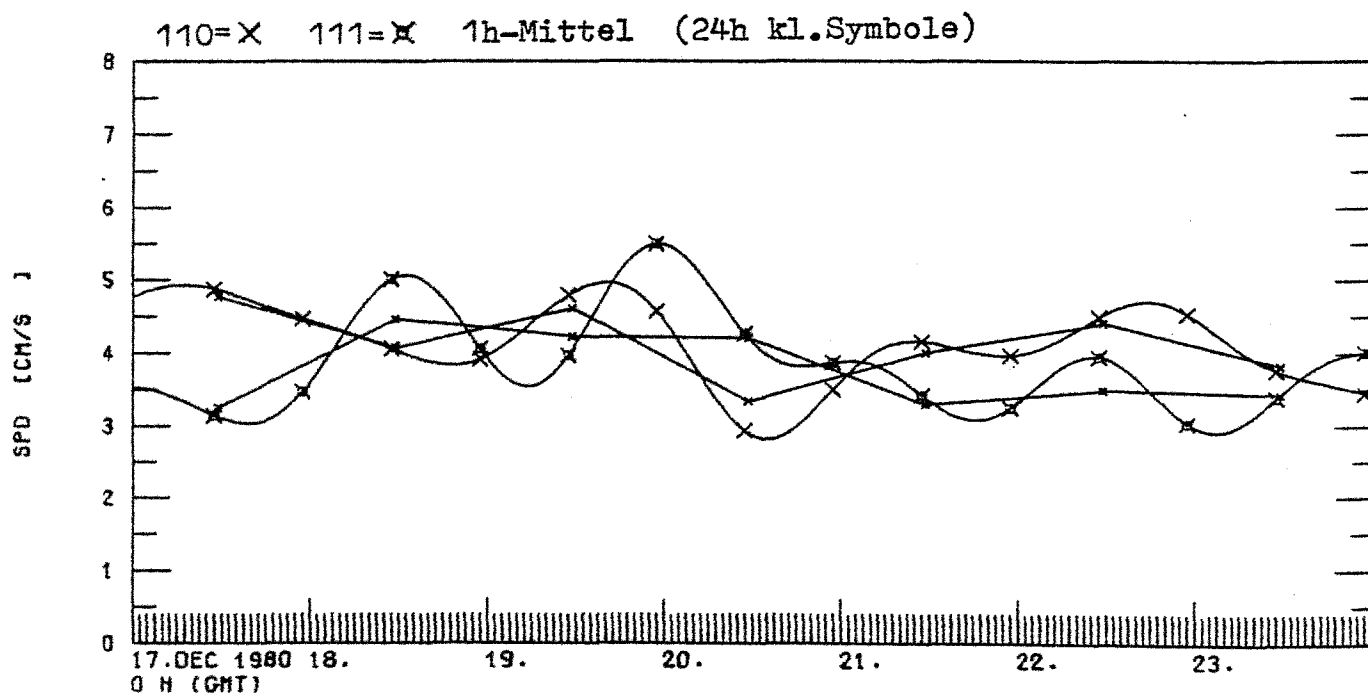


Bild 64: N 276-1 Stromgeschwindigkeit der Geräte 110(1100 m),
111(1600 m)

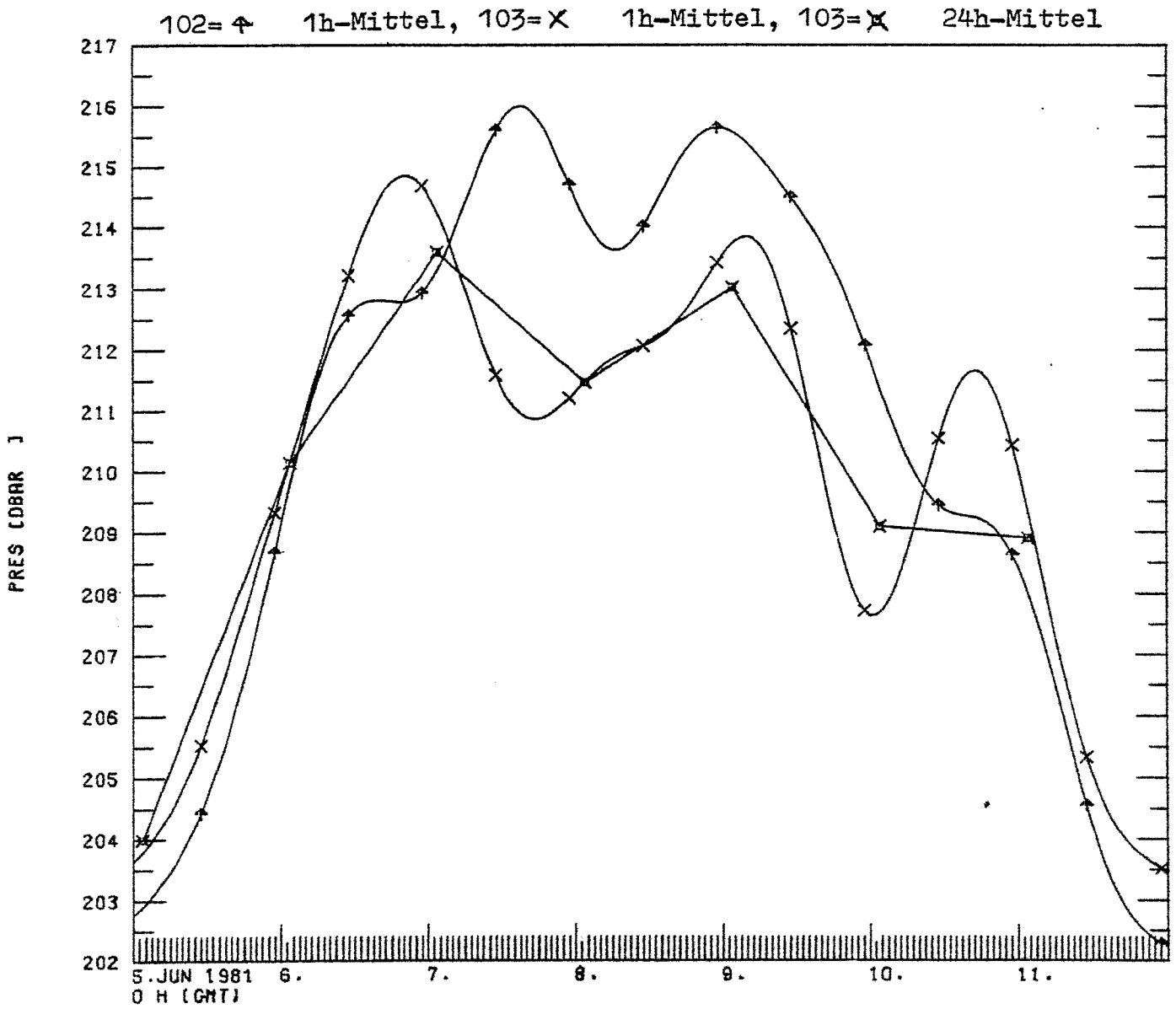


Bild 65: N 276-1 Druckkurven der Geräte 102(198 m), 103(200 m)

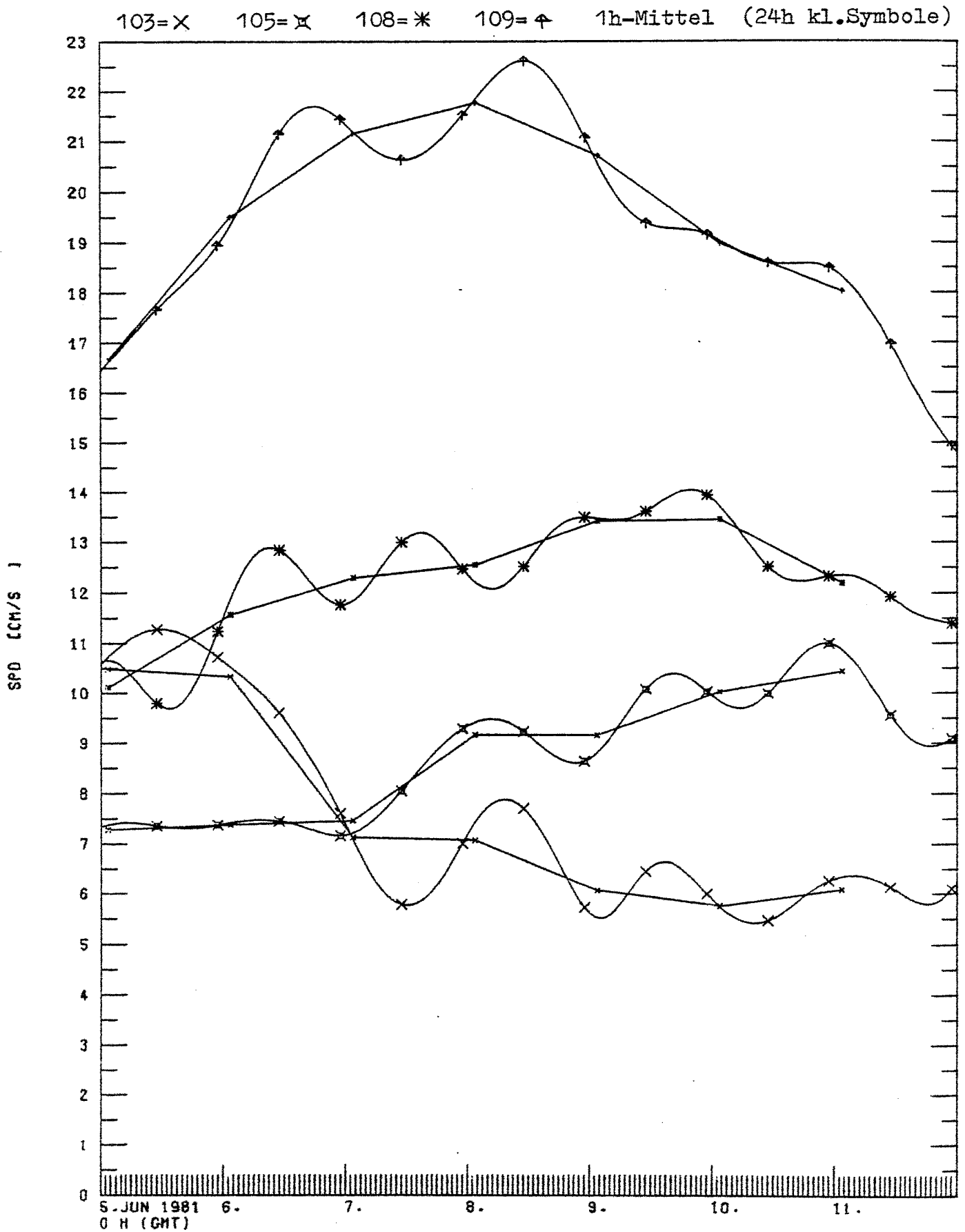


Bild 66: N 276-1 Stromgeschwindigkeit der Geräte 103(200 m),
105(500 m), 108(700 m), 109(1000 m)

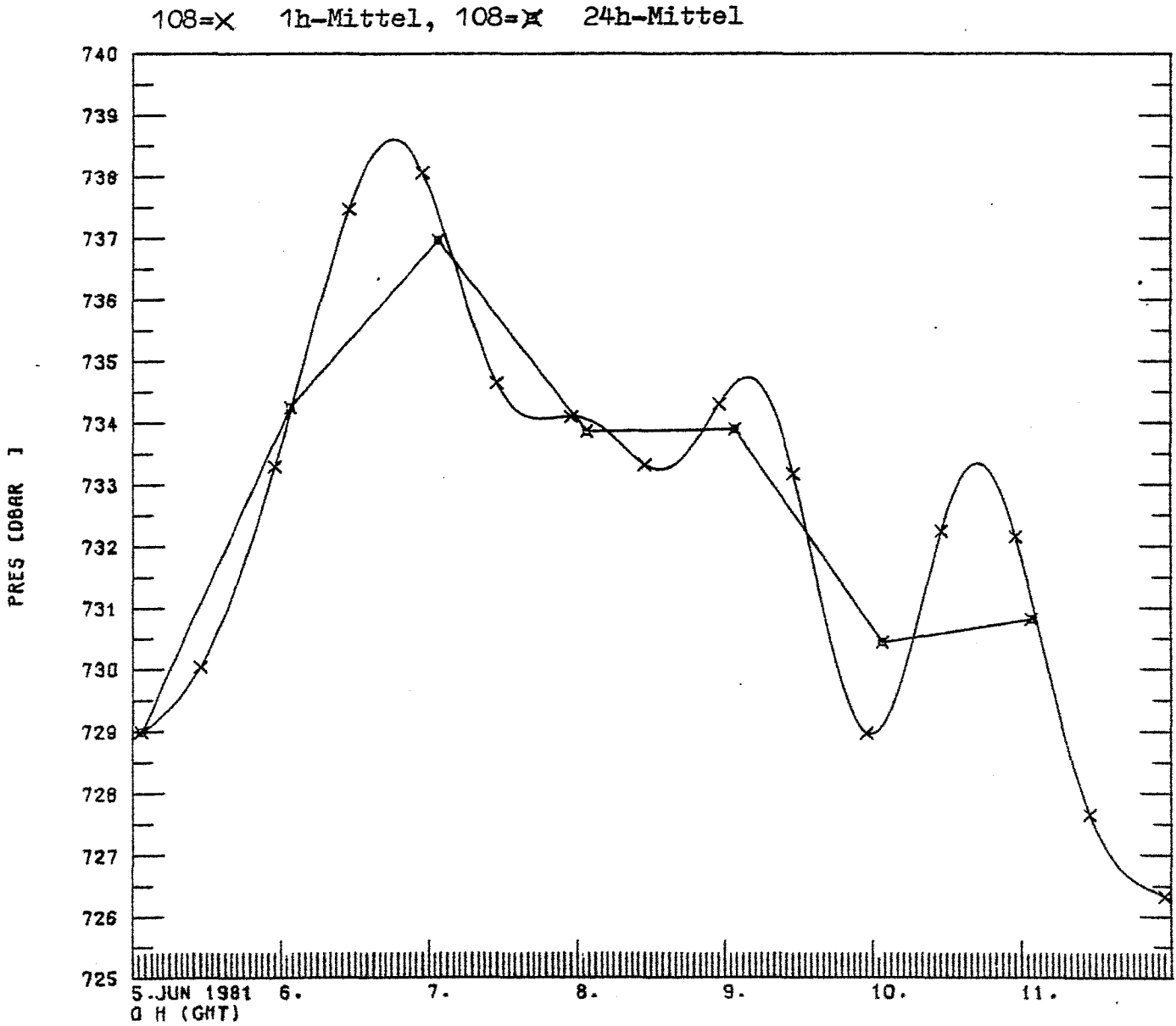


Bild 67: N 276-1 Druckkurve für Gerät 108(700 m)

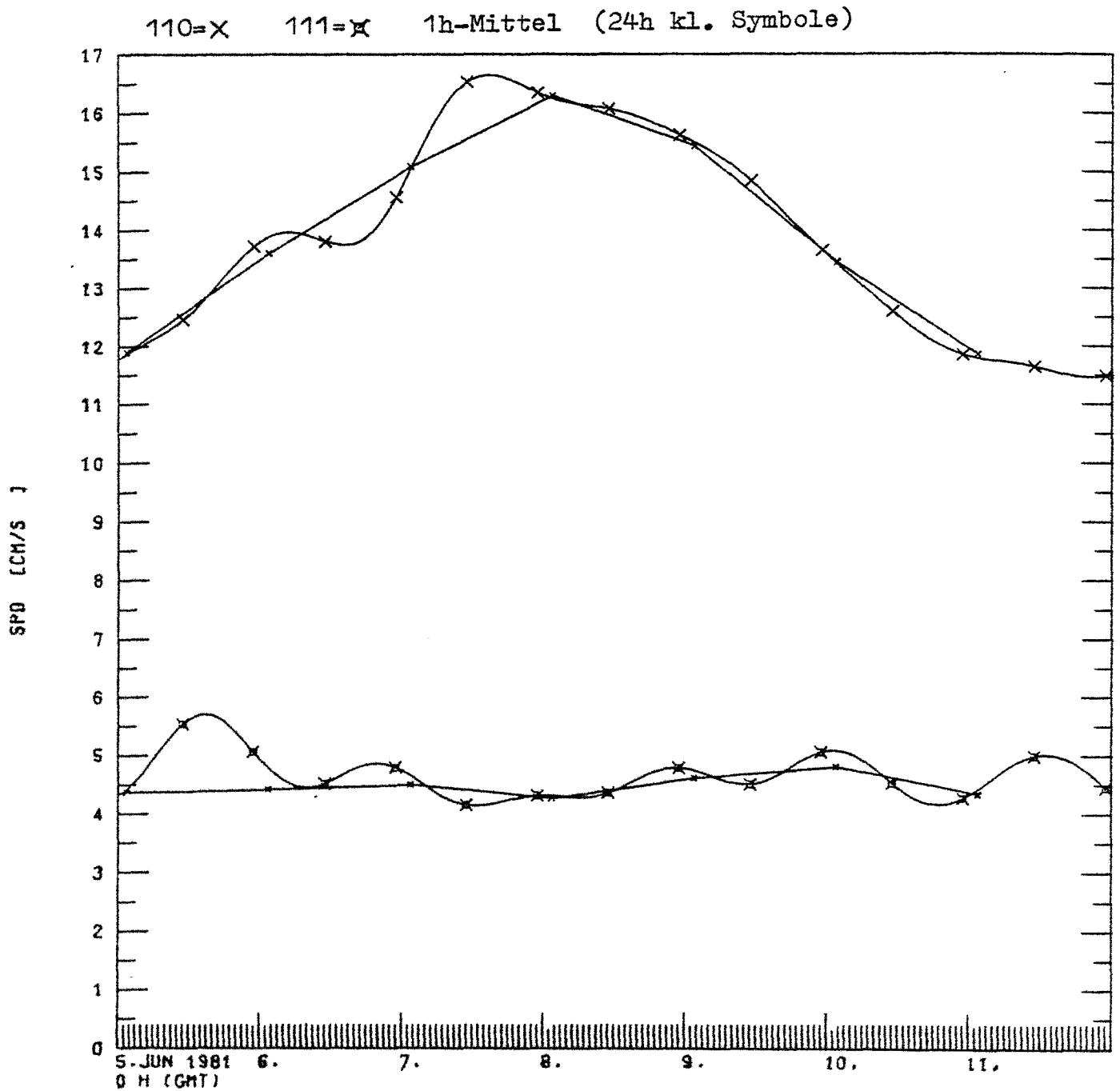


Bild 68: N 276-1 Stromgeschwindigkeit der Geräte 110(1100 m),
111(1600 m)

N 276-1

Datum	Tiefe	Strom geschw.	Strom richtg.	Z _D	Z _S
19.12.80	0	0.4	175		
	100	0.35	175		
	180	0.3	175		
	290	0.237	175	270.8	270
	600	0.1	180		
	800	0.072	175	782.2	782
	1000	0.056	170		
	1100	0.043	175		
	1700	0.043	180		
	5250	0.036	180		
	5300	0.001	180		
22.12.80	0	0.4	160		
	100	0.4	160		
	180	0.3	160		
	290	0.202	160	268.9	263
	600	0.118	165		
	800	0.086	165	780.5	778
	1000	0.039	170		
	1100	0.043	170		
	1700	0.037	170		
	5250	0.026	170		
	5300	0.001	170		
07.06.81	0	0.5	350		
	100	0.4	355		
	180	0.4	355		
	290	0.074	355	272.3	273
	600	0.074	390		
	800	0.122	395	784.1	785
	1000	0.213	390		
	1100	0.15	385		
	1700	0.047	390		
	5250	0.03	390		
	5300	0.001	390		
09.06.81	0	0.5	25		
	100	0.4	25		
	180	0.4	25		
	290	0.061	25	277.0	273
	600	0.092	30		
	800	0.135	35	788.9	278
	1000	0.208	20		
	1100	0.155	20		
	1700	0.048	25		
	5250	0.026	25		
	5300	0.001	25		

Tabelle 11

J 226:

Für diese Verankerung wurde nur der Zeitraum vom 20.07.78 bis 27.07.78 betrachtet, weil beide Extremfälle innerhalb dieses Bereichs liegen. Die Zeitreihen sind in den Bildern 69 bis 72 dargestellt. Wichtig für die Berechnungen waren der 21.07. und der 25.07., die sowohl die Ruhelage als auch ein Abtauchen von ungefähr 50 m repräsentieren. Einen Sonderfall stellt diese Verankerung dadurch dar, daß an dem obersten Auftriebskörper eine Leine mit drei kleinen Fischerkugeln zur Markierung befestigt war. Damit wirkt auf diese Komponente eine zusätzliche Kraft, deren Richtung und Betrag durch die fehlenden Informationen über die Strömung in der obersten Schicht nicht genau bekannt ist. Andererseits ist diese äußere Kraft, wie noch zu sehen ist, auch bei kleinen Beträgen nicht vernachlässigbar. Die gerechneten Stromprofile sind in Tabelle 12 zusammengefaßt.

Es bedeuten Z_0 = errechnete Tiefe der Drucksensoren
 Z_s = errechnete Solltiefe dieser Instrumente

(neu) = verbessertes Stromprofil

Die Differenz zwischen Solltiefe Z_s und errechneter Tiefe der Druckmesser Z_0 konnte bei dieser Verankerung nicht innerhalb der bei den NEADS-Verankerungen angewandten Fehlergrenzen gehalten werden. Eine mögliche Erklärung wird in Teil 11.4 dieses Kapitels gegeben.

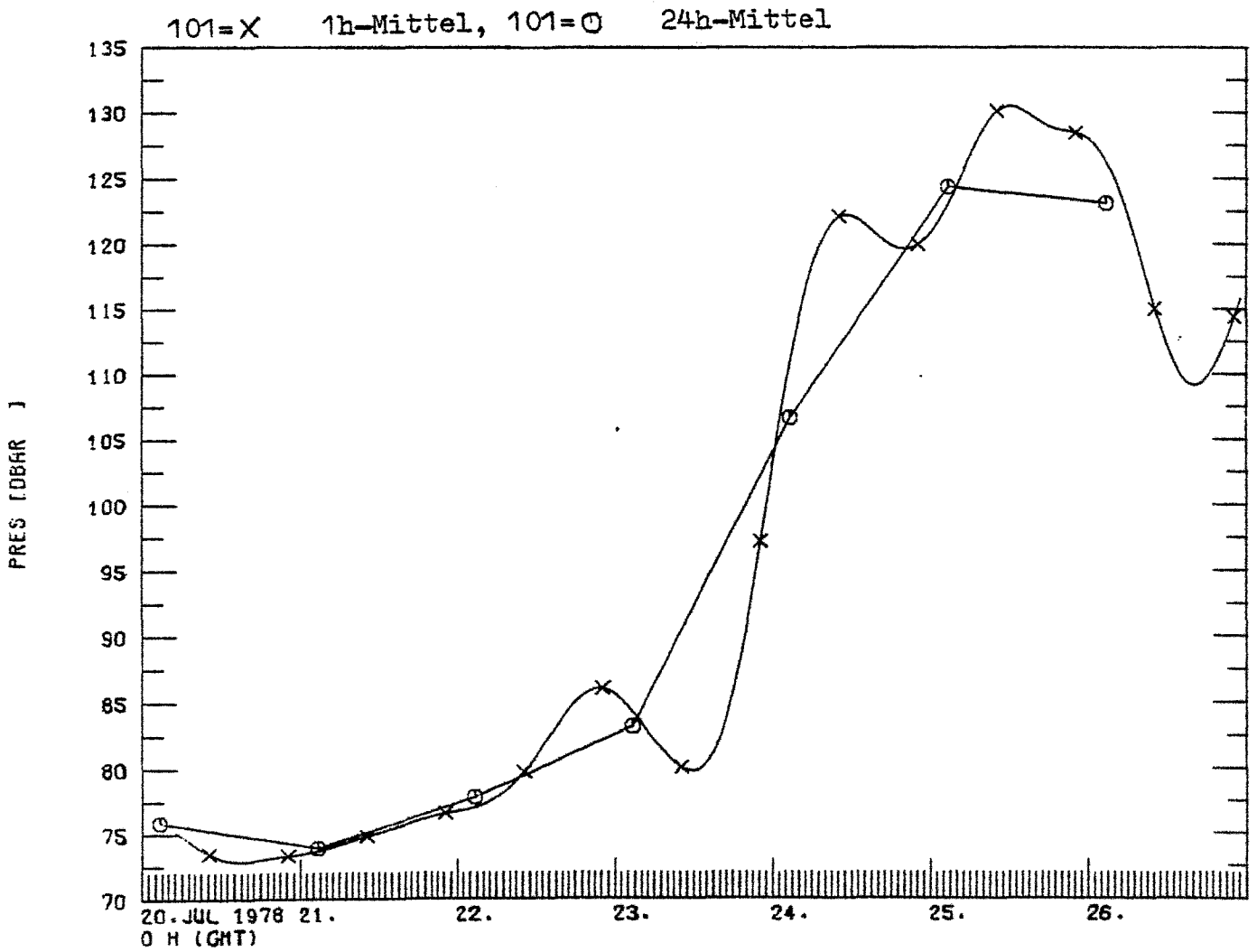


Bild 69: J 226 Druckkurve für Gerät 101(70 m)

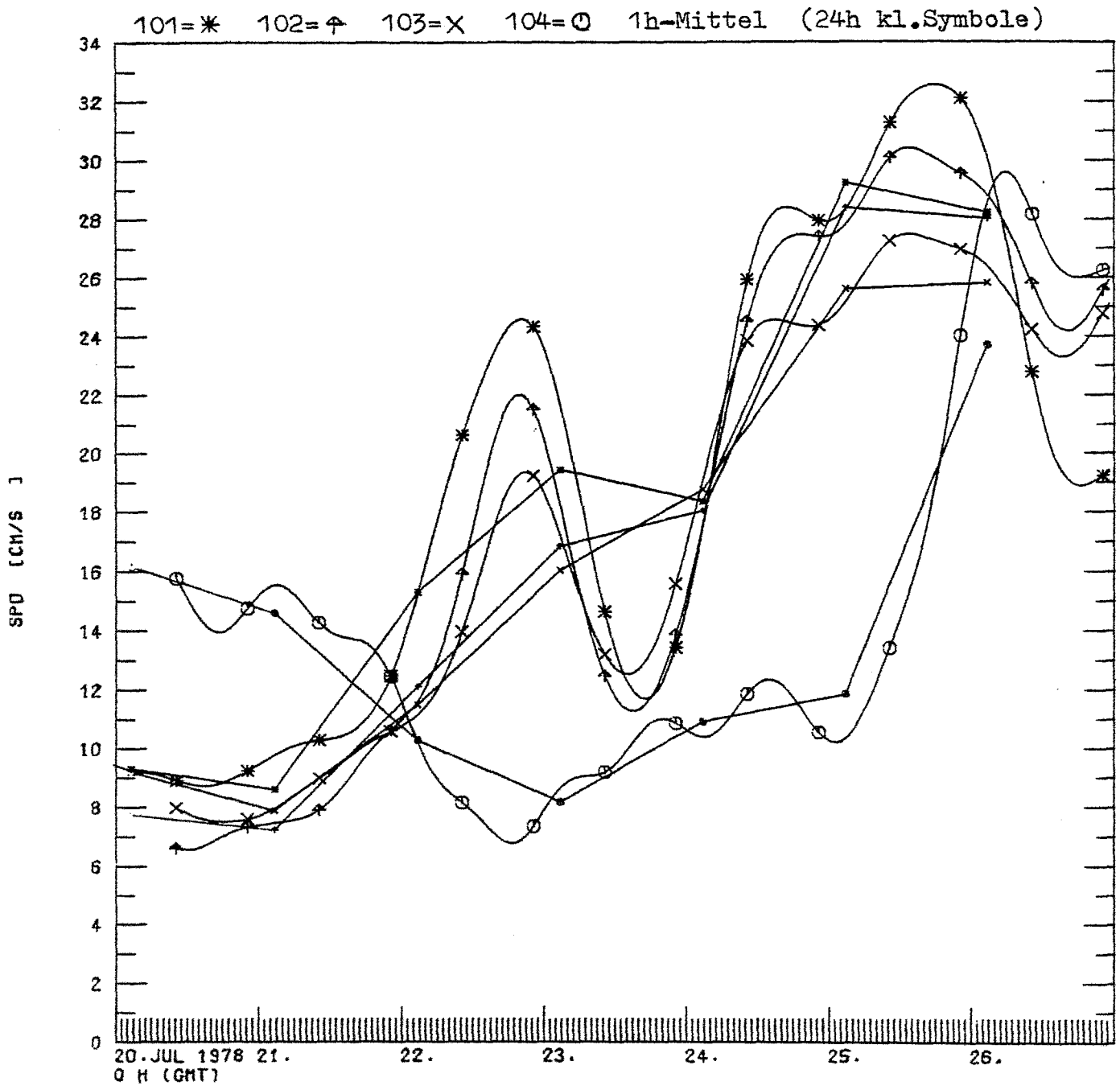


Bild 70: J 226 Stromgeschwindigkeit der Geräte 101(70 m),
102(170 m), 103(270 m), 104(470 m)

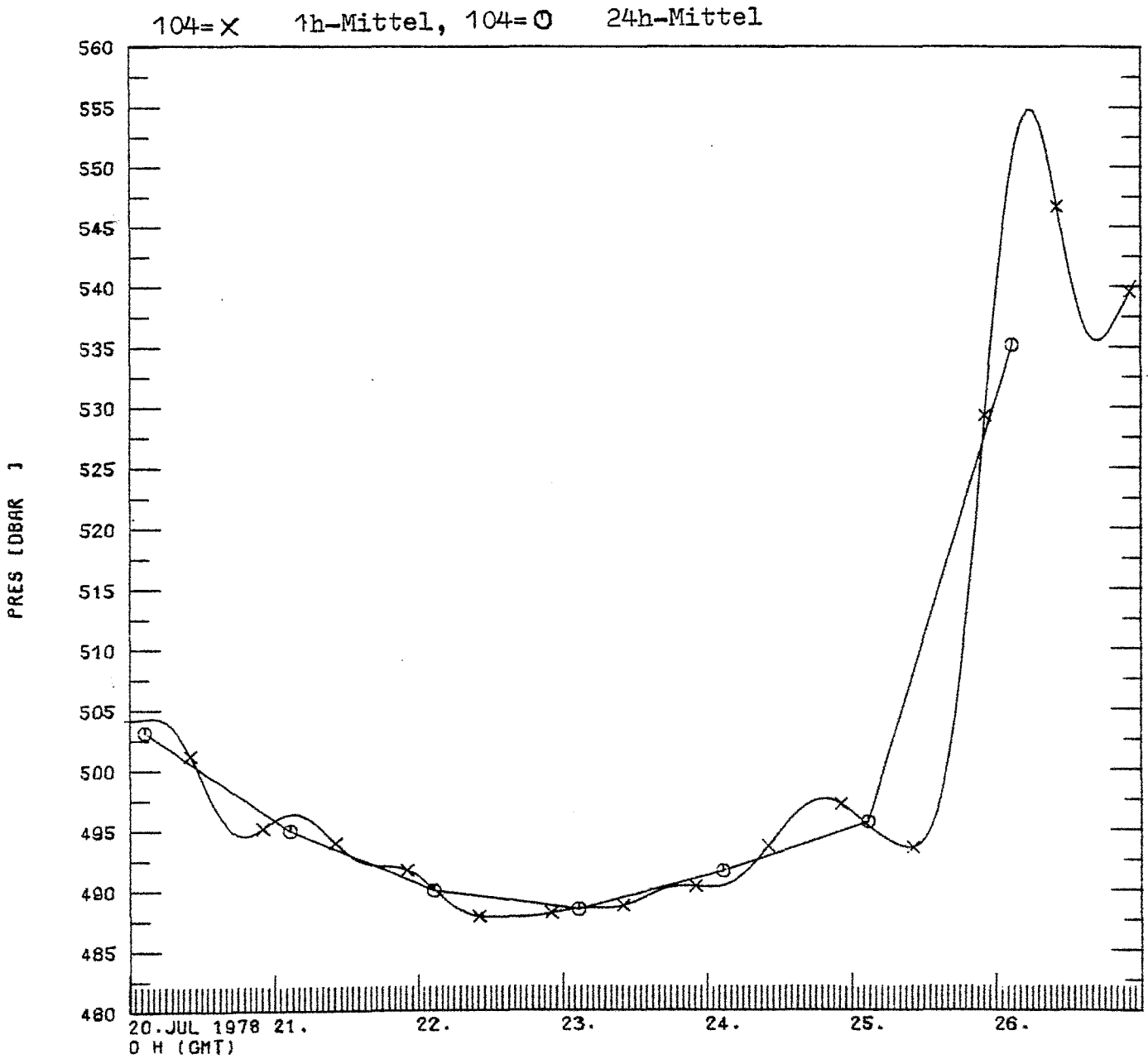


Bild 71: J 226 Druckkurve für Gerät 104(470 m)

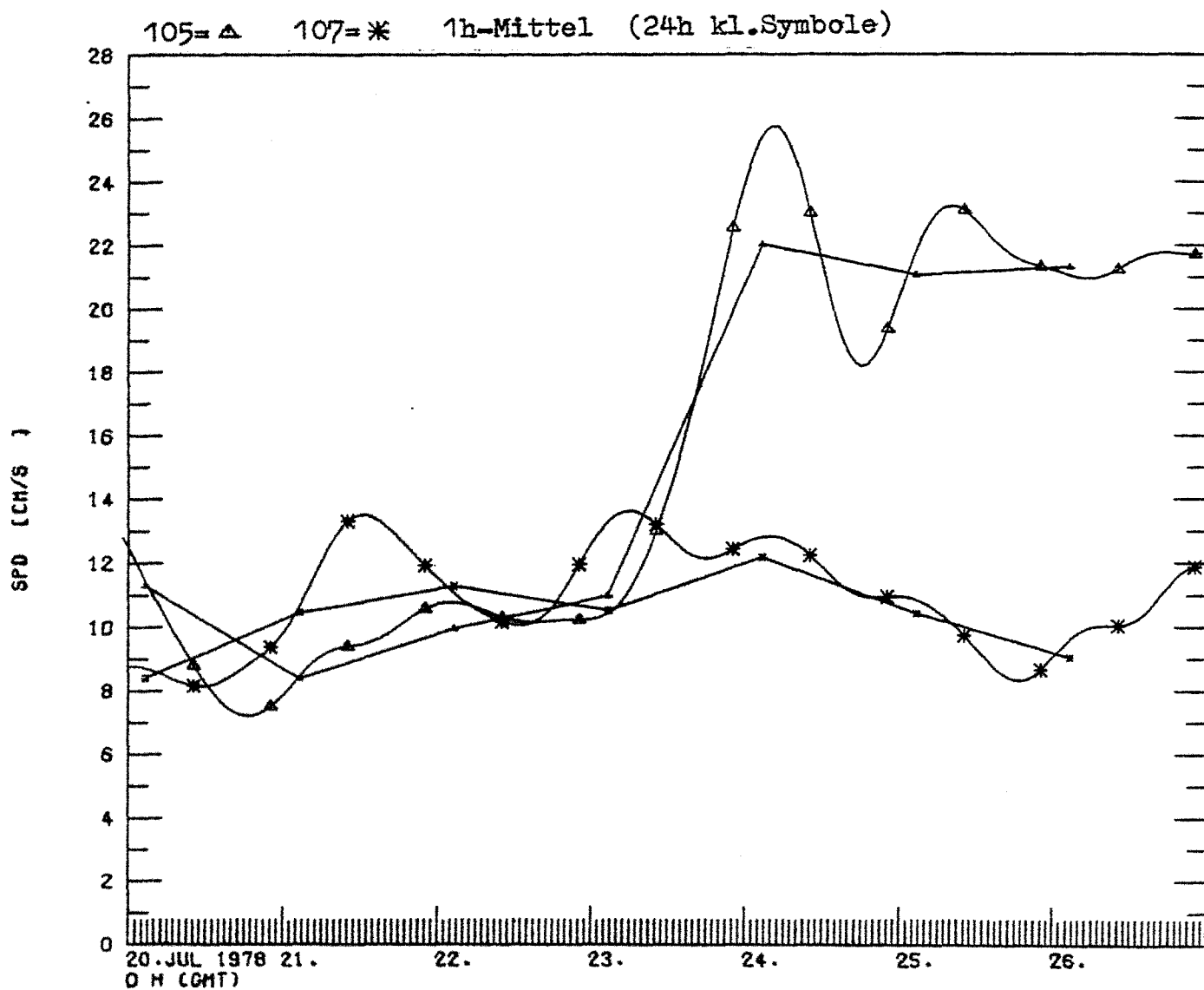


Bild 72: J 226 Stromgeschwindigkeit der Geräte 105(580 m),
107(980 m).

J 226

Datum	Tiefe	Strom geschw.	Strom richtg.	Z _D	Z _S
21.7.78	0	0.09	245	67.7	73.9
	73	0.087	245		
	170	0.073	270		
	270	0.08	260		
	491	0.148	190	476.9	487.3
	580	0.087	235		
	980	0.103	210		
	1577	0.001	210		
25.7.78	0	0.29	240	79.0	116
	122	0.289	240		
	170	0.283	240		
	270	0.257	247		
	505	0.16	270	486.8	529.4
	580	0.21	255		
	980	0.1	260		
	1577	0.001	260		
25.7.78 (neu 1)	0	0.65	240	92.1	116
	50	0.6	240		
	100	0.38	240		
	122	0.289	240		
	170	0.283	240		
	270	0.257	247	497.2	529.4
	505	0.16	270		
	580	0.21	255		
	980	0.1	260		
	1550	0.1	260		
	1577	0.001	260		
25.7.78 (neu 2)	0	0.65	240	95.1	116
	50	0.6	240		
	100	0.38	240		
	122	0.289	240		
	170	0.283	240		
	270	0.257	247	500.4	529.4
	450	0.230	260		
	505	0.160	270		
	530	0.2	260		
	580	0.21	255		
	930	0.21	260		
	980	0.1	260		
	1550	0.1	260		
	1577	0.001	260		
	Gleiches Profil mit äußerer			101.1	116
	Kraft (012,065,240)			505.0	529.4

Tabelle 12

11.2 Auswertung der Neigungsmesserdaten

Bei den im Institut für Meereskunde in Kiel eingesetzten Neigungsmessern handelt es sich um Eigenentwicklungen, die als Sensoren je zwei Beschleunigungsmesser verwenden. Wie aus Bild 73 ersichtlich, sind die Beschleunigungsmesser senkrecht zueinander in horizontaler Lage angeordnet.

Die Beschleunigungsmesser messen Beschleunigung aus der Vertikallage, die den Neigungswinkeln in ihrer Achse (A oder B) aus der Vertikalen entsprechen. Zusätzlich enthält jeder Neigungsmesser einen Kompaß, der die räumliche Lage des Gerätes anzeigt.

Die Achse des Neigungsmessers B ist dabei um den Winkel $\alpha = 27^\circ$ aus Kompaßnord rechtweisend verdreht.

Es bedeuten

NK = Kompaßnord (magnetisch Nord)

NN = Neigungsmesser Nord

A, B = Beschleunigungssensoren

Geben die beiden Sensoren zu einem Zeitpunkt zwei Beschleunigungswerte A_1 und B_1 an, so entsprechen diese den Neigungswinkeln in den Achsenrichtungen von A und B. Durch Vektoraddition erhält man den resultierenden Beschleunigungsvektor und damit die Gesamtheigung aus der Vertikalen (siehe Bild 74).

Durch Umrechnung in Polarkoordinaten erhält man den Winkel ($\sigma - \alpha$) zwischen Neigungsmesser Nord und dem resultierenden Vektor. Addiert man dazu den Korrekturwinkel $\alpha = 27^\circ$, so

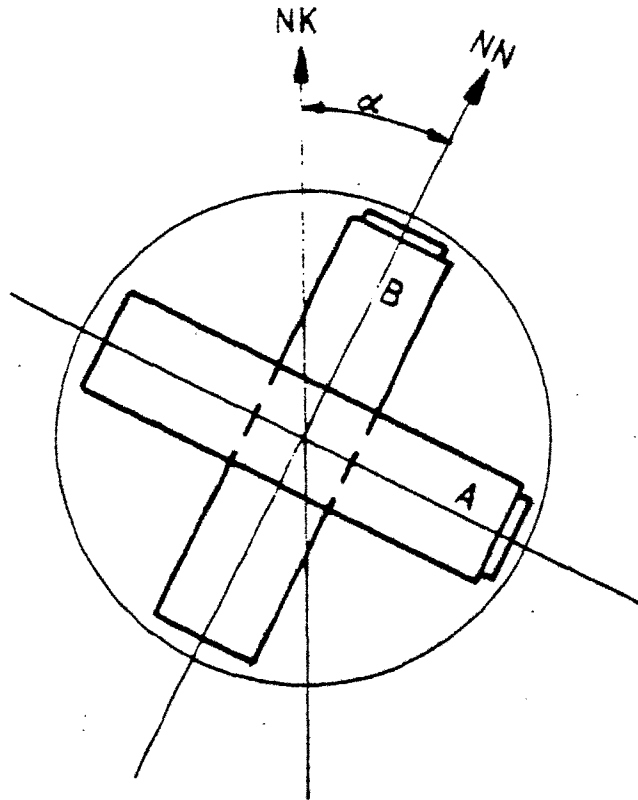


Bild 73: Lage der Sensoren im Neigungsmesser

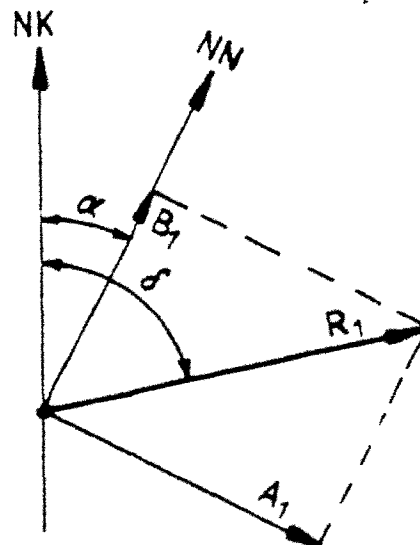


Bild 74: Berechnung der Neigungsgrößen

erhält man die wahre Neigungsrichtung, falls man noch die Mißweisung des Kompasses auf der Verankerungsposition berücksichtigt.

Die so korrigierten Werte werden nun mit den berechneten Neigungswinkeln und Neigungsrichtungen des Rechenprogramms für diese Verankerung verglichen.

11.3 Vergleich der Neigungswinkel

Die folgende Übersicht zeigt, daß die berechneten Neigungswinkel in der Größenordnung übereinstimmen, jedoch bis zu 50 % Abweichung an Tagen starker Stromgeschwindigkeit aufweisen.

Neigung berechnet	Richtung berechnet	Neigung gemessen	Richtung gemessen	Strom- geschw.	Datum
4.1	175°	8.12	170°	groß	19.12.80
4.0	160°	7.58	150°	groß	22.12.80
0.7	175°	5.9	160°	gering	31.12.80

Bei geringer Stromgeschwindigkeit ist die Winkeldifferenz allerdings sehr groß, was bei der sonst guten Übereinstimmung des Programms gerade bei den NEADS-Verankerungen nicht verständlich ist. Die Richtungsabweichungen sind in allen Stromphasen gering.

Als mögliche Fehlerquellen bieten sich an:

- a) Der Neigungsmesser wurde zwar geeicht, aber es können durch schräge Aufhängung im Seil (Halterung nicht genau parallel Neigungsachse und Seilachse) selbst bei Nullstrom schon Neigungswinkel in der Größe von einigen Grad auftreten. Diese Aussage wird durch die Messung am 31.12. bestätigt, da für diese geringen Stromgeschwindigkeiten eine Neigung von 5.9° in 700 m Tiefe als zu hoch erscheint (siehe Tab. 11).
- b) Die gewählte Segmentlänge im Programm betrug 50 m wie bei allen Rechnungen. Durch Verringerung dieser Größe läßt sich die Genauigkeit der räumlichen Kurve, die durch die Verankerung gebildet wird, erhöhen, was auch zu etwas geänderten Winkeln der Komponenten führt. Verbunden damit ist aber ein erhöhter Bedarf an Rechenzeit, wobei die Winkeländerung im Zehntelgrad-Bereich liegt.
- c) Die Auftriebsanordnung direkt über dem Neigungsmesser, bestehend aus drei Benthos-Kugeln, ist unsymmetrisch. Es ist dadurch eine Neigung der Achse des Gerätes wahrscheinlich, deren Größe hier jedoch nicht abzuschätzen ist.

11.4 Auswertung der errechneten Verankerungskonfiguration bei verschiedenen aktuellen Stromprofilen

Die sehr labile Verankerung N 184 zeigt in Bild 75 starke Änderungen in der Verankerungsanordnung bei kleinen Veränderungen in der Stromgeschwindigkeit. Außerdem fällt auf, daß der Unterschied im Stromprofil vom 16.06.77 zwischen reinen Meßwerten und den neuen, ergänzten Daten immerhin eine zusätzliche Auslenkung von mehr als 200 m bringt. Die Abtauchrate erhöht sich dabei um 17 m.

Ob die ergänzten Stromwerte allerdings das wirkliche Stromprofil gut wiedergeben, muß bezweifelt werden, da nur vier Anhaltspunkte, die vier eingebauten Strommesser, gegenüber der großen Wassertiefe einfach viel zu gering sind. Dennoch erlauben die dargestellten Kurven die Aussage, daß es bei dieser Verankerung, wie bei allen anderen NEADS-Verankerungen, möglich ist, das Stromprofil durch realistische Werte so anzunähern, daß jede Abtauchtiefe erzeugt werden kann (siehe auch Kapitel 10).

Die Verankerung N 230 soll nicht weiter betrachtet werden, da die Schwankungen in den Druckdaten und damit die Tiefenänderungen der Meßinstrumente viel zu gering waren, um Schwierigkeiten in der Wahl eines geeigneten Stromprofils hervorzurufen. Für diese geringen Stromgeschwindigkeiten reichten nach Ausfall des Instrumentes in 1400 m Tiefe die verbliebenen drei Datenpunkte aus, um das Anströmverhalten zu rekonstruieren (Bild 76).

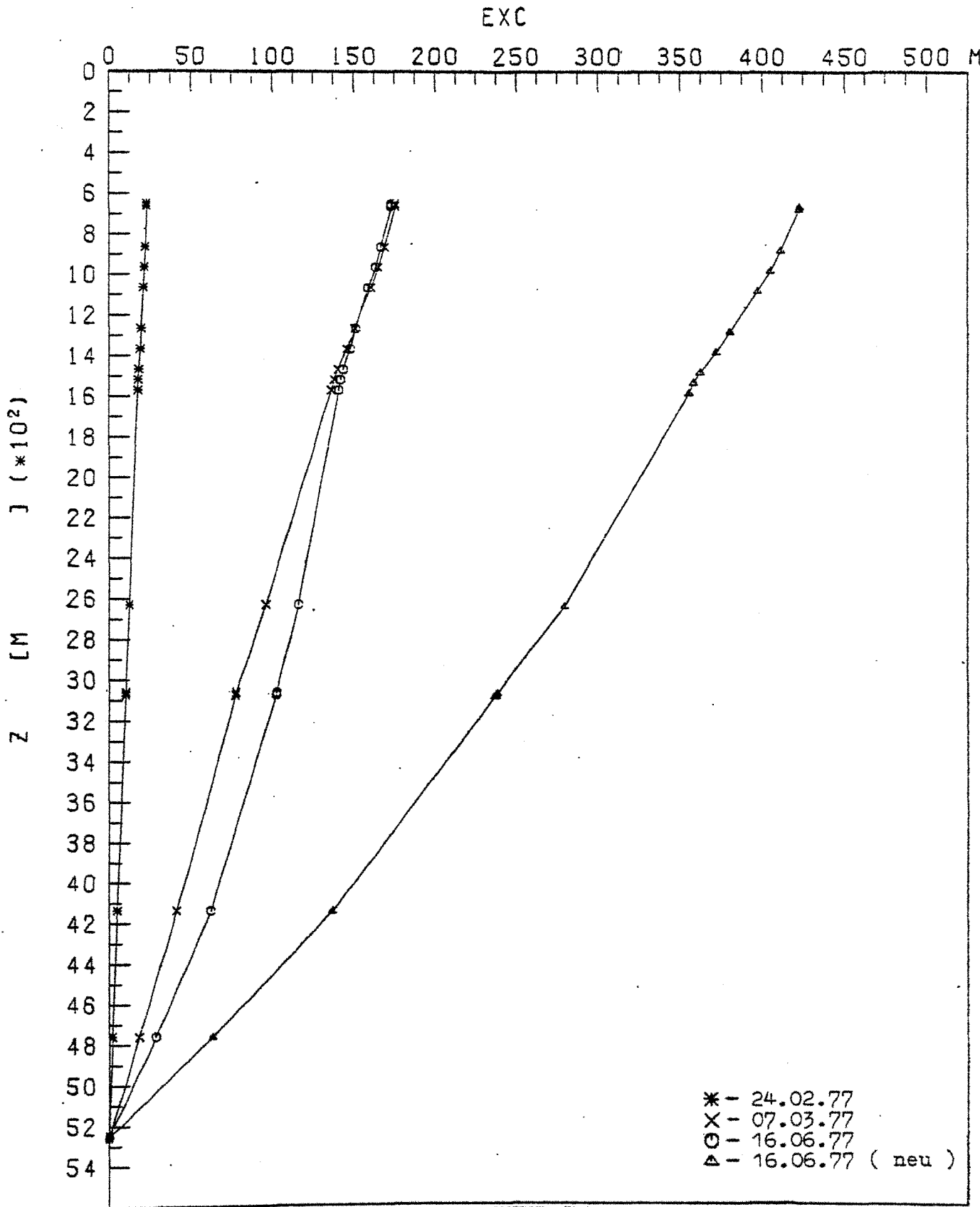


Bild 75: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung N 184 für die ausgewählten
gemittelten Stromprofile

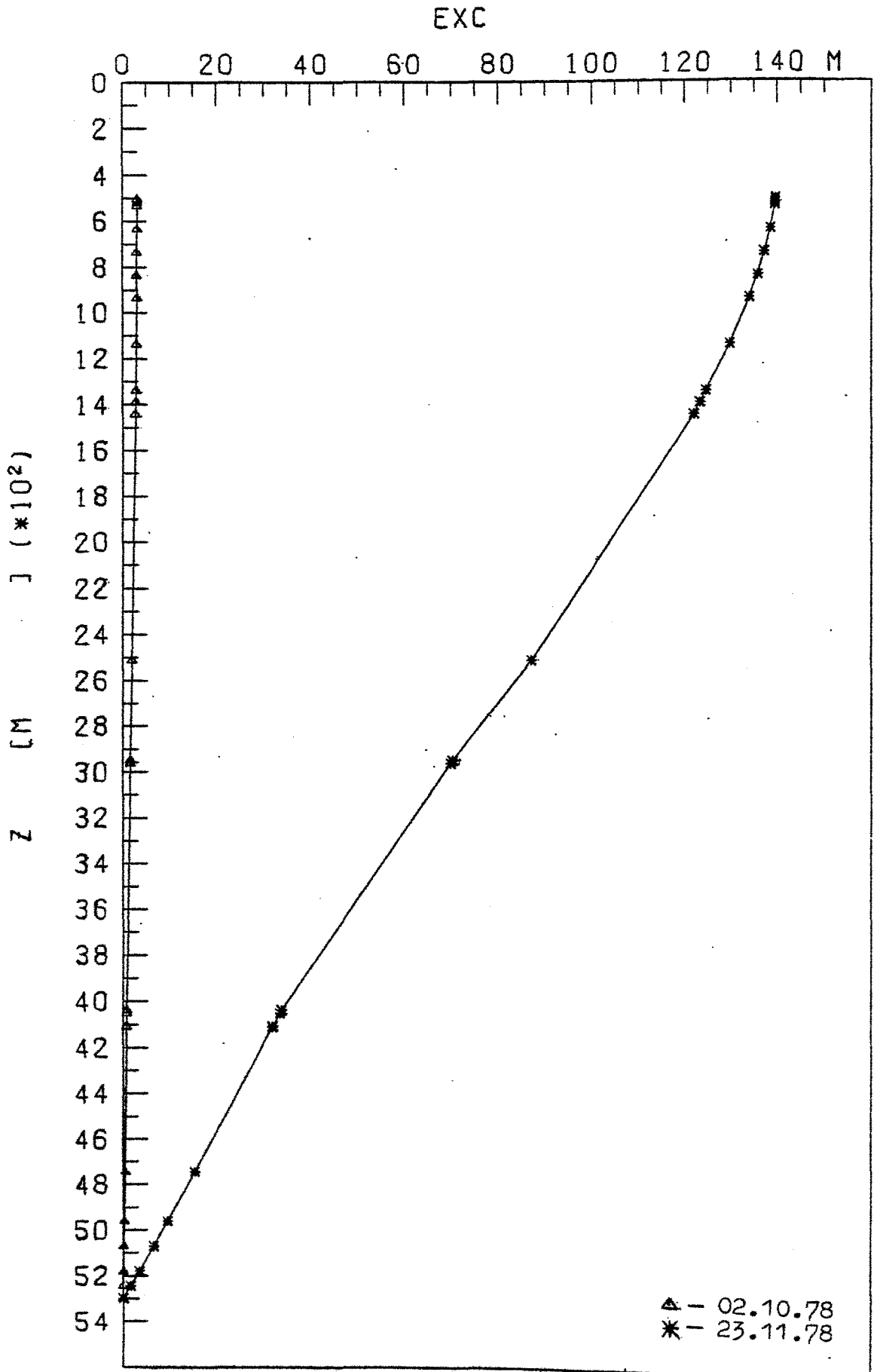


Bild 76: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker der Verankerung N 230 für die ausgewählten gemittelten Stromprofile

Eine ganz andere Voraussetzung dagegen bietet Verankerung N 276-1, die immerhin sechs Meßinstrumente mit Stromdaten der obersten 1600 m aufzuweisen hat. Durch den teilweisen Verlust der Verankerung fehlen jedoch die wichtigen Werte der obersten 200 m sowie die Daten unterhalb von 1600 m. Wie bereits beschrieben, reagiert diese Verankerung besonders auf Einflüsse im oberen Teil des Seils, was dazu führt, daß die für die vier ausgewählten Tage angegebenen Stromprofile nur Näherungswerte darstellen können. Trotzdem lassen sich damit gute Übereinstimmungen mit den registrierten Daten erzielen. Tabelle 11 und Bild 77 zeigen die errechneten Werte.

Durch die Einwirkung einer äußeren Kraft auf den obersten Auftriebskörper der Verankerung J 226 infolge der Oberflächenmarkierungen, gibt es bei der Berechnung des Verankerungsverhaltens einen zusätzlichen Faktor, der nicht genau bekannt ist. Der Einfluß bei geringem Strom in der oberen Schicht wird vernachlässigbar sein, da die Fischerkugeln mit einem Auftrieb von zusammen etwa 12 Kp über die lose Verbindungsleine kaum signifikante Kräfte auf die Verankerung übertragen werden. Anders dagegen bei starken Stromgeschwindigkeiten in der oberflächennahen Schicht. In diesem Fall werden die Markierungskugeln mit der Strömung bewegt bis das Verbindungsseil straff gespannt ist. Steigen die Stromgeschwindigkeiten weiter, so tauchen die Kugeln unter und vergrößern dadurch den Zugwinkel aus der Vertikalen und damit die Kraft auf die Verankerung. Diese zu-

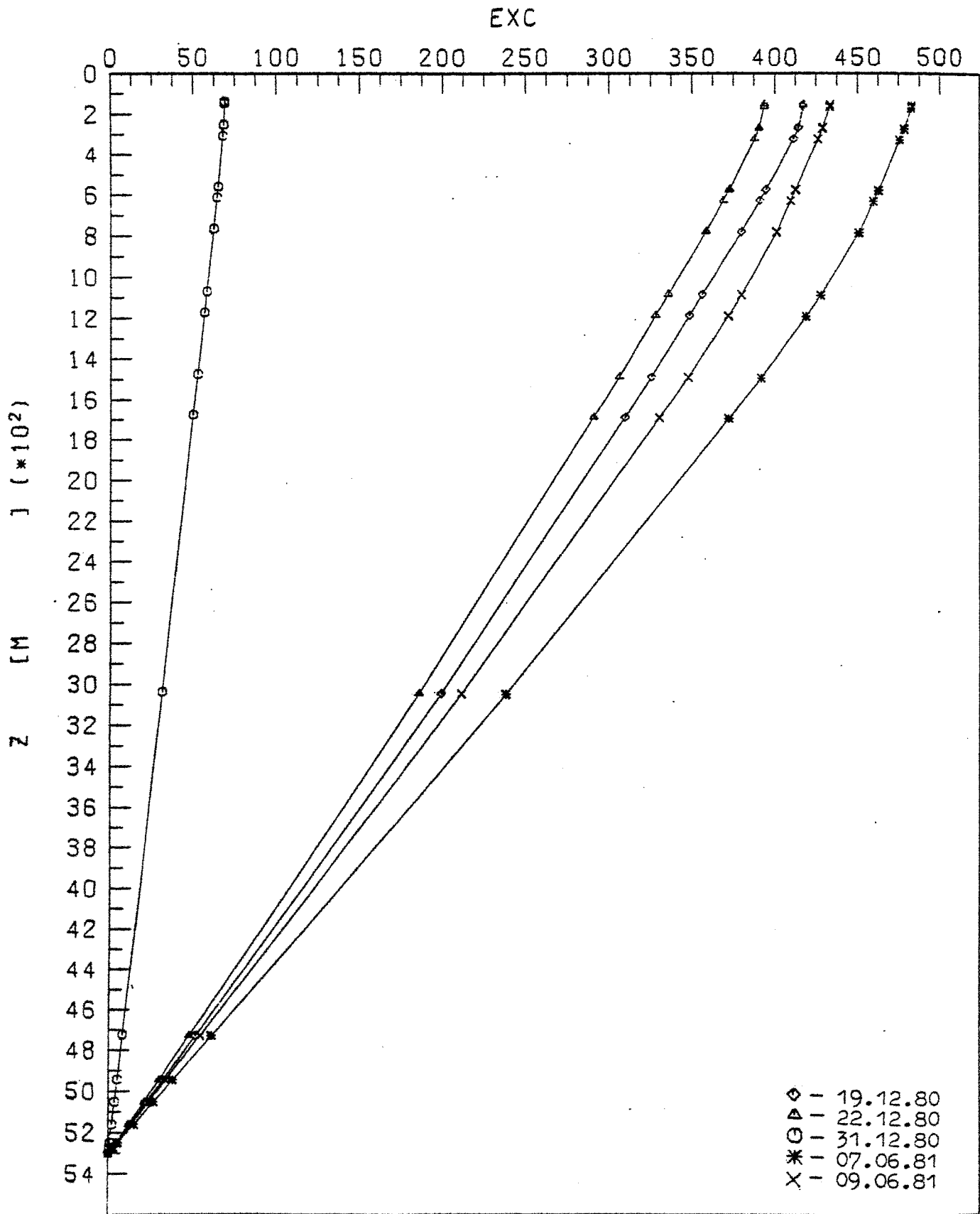


Bild 77: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung N 276-1 für die ausgewählten
gemittelten Stromprofile

sätzliche äußere Kraft wurde daher mit 12 Kp unter 65° Vertikalwinkel in Stromrichtung angenommen. Nur so sind auch einigermaßen gute Näherungswerte an die Solltiefen bei starken Stromlagen, wie am 25.7.78, möglich. Trotzdem bleiben Differenzen von 15 m bei einer Abtauchrate von 50 m bestehen. Zurückzuführen sind diese Fehler sicherlich auf das auch hier nur ungenügend bekannte Stromprofil. Trotz der sechs funktionierenden Strommeßgeräte, durch die man eine relativ gute Vertikalverteilung hat, sind bei den im JASIN-Gebiet vorherrschenden hohen Stromgeschwindigkeiten die Unsicherheiten in der Bestimmung der Stromstärken zwischen den Geräten so groß, daß keine besseren Vorhersagen möglich sind. Bild 78 zeigt die berechneten Kurven für den 21.7., mit geringen Stromgeschwindigkeiten, und den 25.7. als Zeitpunkt mit starker Stromlage. Dabei sind für diese Phase zwei Kurven mit etwas abgeändertem Stromprofil und eine Kurve mit zusätzlicher Berechnung der äußeren Kraft dargestellt. Eine Rechtfertigung für die Wahl der hohen Stromgeschwindigkeit in der oberflächennahen Schicht der abgeänderten Profile sind die Messungen von Tarbell, Briscoe u. Weller (1979), die die Daten der W1, W2 und W3 Verankerungen im JASIN-Gebiet ausgewertet haben. Sie ergeben ähnlich große Stromstärken innerhalb der obersten 150 m. Es zeigt sich, daß selbst eine geringe Zusatzkraft ein wesentlich besseres Ergebnis bringt und damit eine Bestätigung für den großen Einfluß dieser Größe ergibt. Auskunft über die Beträge der errechneten Werte gibt Tabelle 12.

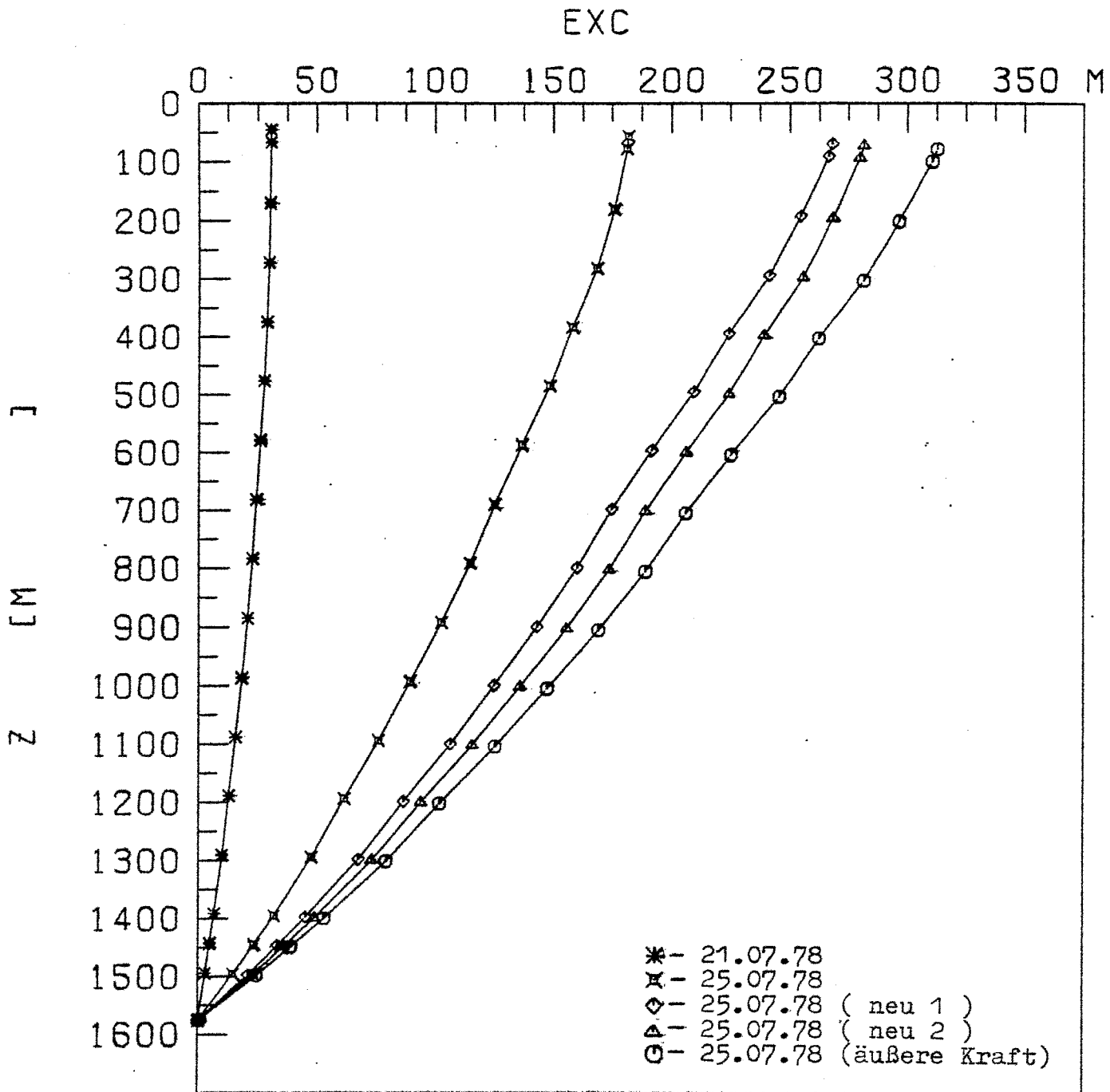


Bild 78: Gesamtabweichung der Komponenten vom Anker
der Verankerung J 226 für die ausgewählten
gemittelten Stromprofile

12. Einfluß der einzelnen Parameter auf die Genauigkeit des Programms

Obwohl nicht Thema dieser Arbeit, sollen doch einige Bemerkungen über die Sensitivität des Programms durch Veränderungen der Eingabeparameter gemacht werden. In den über 100 Programmläufen, die zur Erstellung des Rechenprogramms und zur Behandlung der verschiedenen Stromprofile durchgeführt wurden, traten mehr oder weniger zufällig Veränderungen in den Verankerungskonfigurationen auf, die im nachhinein Aussagen über den Einfluß einiger Parameter auf die Genauigkeit der Vorhersage der Verankerungsbewegungen durch das Programm ermöglichen. Dieses ist insbesondere wichtig für einen Überblick des Benutzers, der die Genauigkeitsanforderungen an die Inputdaten kennen sollte, um sich auf die wesentlichen Daten konzentrieren zu können.

12.1 Auftrieb und Gewicht

Diese beiden Variablen bestimmen zumindest für den stromlosen Fall fast ausschließlich die Anordnung der Geräte in der Verankerung und damit die Tiefenlage der Instrumente. Es ist deshalb einleuchtend, daß selbst kleine Änderungen des Auftriebs einen relativ großen Einfluß auf die Verankerung ausüben.

In den Verankerungen N 184 und N 264 wurde je ein Strommesser des Typs RCM-5 ersetzt, welches einer Gewichtszunahme von nur 3,7 Kp entspricht. Dieser Wert macht 0,7 % des Gewichts oder 1,4 % der Summe aus Auftrieb und Gewicht aus.

Für die Tiefe der obersten Komponente ergibt sich eine Änderung von 2 m bei N 264 und 2,9 m bei N 184, was etwa einem halben Promille Längenänderung des Seils entspricht. Drastischer wird der Tiefenunterschied bei Verankerung N 230. Durch Eingabefehler errechnete das Programm für die beiden Alpia-Auftriebskörper einen um 91 Kp zu kleinen Auftriebswert. Dieses entspricht 13 % des positiven Auftriebs und 43 % der Summe aus Auftrieb und Gewicht. Die dadurch auftretende Tiefenänderung der obersten Komponente betrug 62,8 m, welches einer Längenänderung des Seils von 1,9 % entsprach. Betrachtet man diese Verankerung bei vereinfachten Stromlagen, so stellt man erstaunliche Veränderungen im Abtauchverhalten fest.

Im Bild 79 sind die unterschiedlichen Kurven dargestellt, wobei die Entfernung des Lotpunktes jeder Komponente vom Anker gegen die Tiefe aufgetragen ist. Beträgt die Tiefendifferenz im stromlosen Fall 62,8 m, so werden daraus im linear abnehmenden Stromprofil mit 0,3 m/s Oberflächengeschwindigkeit 196,4 m und im Stromprofil mit konstantem Strom von 0,2 m/sec sogar 248,2 m. Die Entfernungsdifferenz des Lotpunktes der obersten Komponente hat eine Größe von 373,9 m im ersten Profil und wächst auf 474,4 m in der zweiten Strömungsanordnung. Berücksichtigt man nun, daß in einer durchschnittlichen Verankerung wie N 230 die Schäkel-Ring-Schäkel-Verbindungen der Komponenten etwa 80 Kp wiegen und an Bord ein Schäkel oder ein Ring schnell hinzugefügt oder weggelassen wird, so erhält man eine Abweichung des

EXC

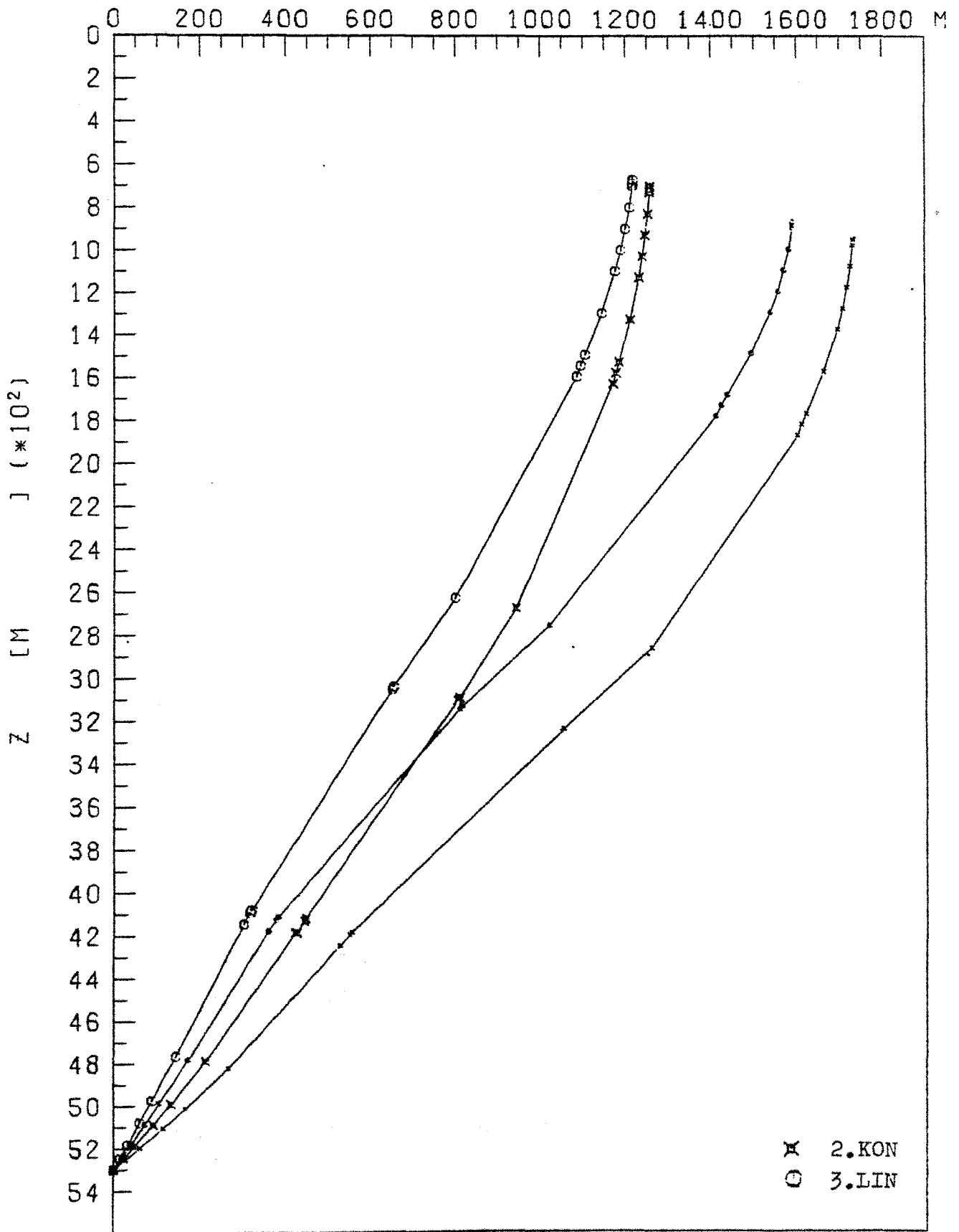


Bild 79: Verankerung N 230 in zwei vereinfachten Stromprofilen. Richtiger Auftrieb-(Gr. Symbole)
Minus 90kp Auftrieb-(Kl. Symbole)

berechneten Gewichts vom wahren Wert in der Größenordnung von ± 6 Kp. Eine zusätzliche Unsicherheit in der Gewichtsbestimmung besteht in den Auftriebskörpern, die sicherlich nicht in jeder Tiefe exakt die Werte aufweisen, die von ihnen angenommen werden. Ein Fehlermaß von ± 10 Kp ist deshalb sicherlich gerechtfertigt. Aus diesem Grunde ist mit einem Fehler in der Tiefenbestimmung von minimal ± 6 m je nach Verankerungstyp allein infolge fehlerhafter Gewichte zu rechnen. Dieser Tiefenfehler kann dann bei starken Strömungen noch erheblich zunehmen. Ich halte es daher für notwendig, die Maßgewichte der verwendeten Geräte auf einen möglichst genauen Wert zu bestimmen.

12.2 Reckberechnung des Perlonseils

Wie bereits erwähnt, weisen beide vorliegenden Reckberechnungen Fehler von 1 bis 2 % der Perlonseillänge auf, die außer durch die Versuchsanordnungen selber auf fehlende Berücksichtigung der Vorreckung des Seils zurückzuführen sind. Diese Ungenauigkeiten lassen sich solange nicht vermeiden, bis durch Reckversuche genauere Last-Dehnungskurven für das verwendete Perlonseil erstellt werden. Würden dabei die Versuchsseile zuvor auf charakteristische Spitzenwerte von 600 - 900 Kp belastet und dann die Dehnungen von Null an bis 600 Kp gemessen, so müßten bei geeichten Meßinstrumenten relativ genaue Dehnungskurven zu erstellen sein.

12.3 Genaue Kenntnis des Stromprofils

Dieser Punkt berührt den wesentlichen Teil der Vorhersage von Verankerungskonfigurationen durch das vorliegende Programm. Wie die Kapitel 10 und 11 zeigen, hat die Kenntnis der Stromgeschwindigkeit und der Stromrichtung an jeder Komponente einen großen Einfluß auf die Güte der Vorhersage. Da aber gerade die Langzeitverankerungen erst Aufschlüsse über die Strömungen einer Region ergeben sollen, ist es bei neuen Verankerungskonzeptionen kaum möglich, bereits gute, gesicherte Stromprofilwerte anzugeben. Ich halte daher eine Rechnung neuer Verankerungen mit vereinfachten, fest vereinbarten Stromprofilen für notwendig, um einen Vergleich untereinander zu ermöglichen. Es könnten dann auch mit der Zeit Regeln für die Konstruktion erstellt werden, die sich auf die Auswertung bereits vorhandener Tiefseeverankerungen stützen.

12.4 Flächen und Widerstandsbeiwerte

Die Angaben zu diesen Parametern stützen sich lediglich auf Rechnungen mit der JASIN-Verankerung J 226 in einem frühen Stadium der Erstellung des Programms. Sie sind also ohne weitere Untersuchungen nicht unbedingt auf andere Verankerungen übertragbar, obgleich eine Einschätzung der Größenordnungen sicherlich keine großen Fehler aufweisen wird. Es wurden die Flächen aller Auftriebe sowie die Seilfläche getrennt um jeweils 10 % erhöht. Außerdem wurden der normale Widerstandsbeiwert ebenfalls um 10 % und der tangentielle

Widerstandsbeiwert um 500 % erhöht. Alle Veränderungen wurden mit dem Stromprofil vom 25.7.78 gerechnet und die Tiefenänderung der obersten Komponente verglichen. Dabei ergaben sich die in Tabelle 16 aufgelisteten Werte. Die Auftriebsselemente nehmen 24,6 % der Gesamtfläche von 22,716 m² ein, während die Seilfläche einen Anteil von 66 % hat. Damit erklärt sich die Vergrößerung der Abtauchtiefe um das 2 1/2-fache bei No. 9 in Tabelle 13.

Sehr viel geringer ist bei diesem Stromprofil die Reaktion auf eine 10 %ige Erhöhung der Auftriebsfläche, die nur eine zusätzliche Tiefenänderung von 6 % bringt. Wird dabei jedoch die Fläche des obersten Elementes verdoppelt, so ändert sich die Tiefe um weitere 31 % der ursprünglichen Abtauchrate von 11,6 m.

Einen stärkeren Einfluß als eine gleichgroße Flächenerhöhung hat eine Vergrößerung des normalen Widerstandskoeffizienten von 10 % zur Folge. Sie läßt die oberste Komponente der Verankerung auf 58,4 m absinken, was einem 17 %igen Zuwachs entspricht. Bemerkenswert ist, daß sogar ein fünfmal größerer tangentialer Widerstandsbeiwert keine zusätzlichen Tiefenänderungen bringt, zumindestens nicht bei diesem speziellen Stromprofil.

Es fällt auf, daß alle Änderungen der beiden Parameter eine spürbare Tiefenänderung dieser Verankerung hervorrufen, die jedoch im Vergleich zu den Gewichten und Auftriebswerten etwas geringer ist. Zu beachten ist auch der relativ große

J 226 ; Stromprofil vom 25.07.78		
Nr.	Tiefe d. obersten Komponente (m)	Art der Veränderung
1	44,8	Ruhelage ohne Strömung
2	56,4	Stromprofil vom 25.7.78 unverändert
3	57,1	Fläche aller Auftriebs- elemente um 10 % erhöht
4	57,5	Fläche des Seils um 10 % erhöht
5	58,4	CDN + 10 %
6	58,4	CDN + 10 % und CDT x 5
7	59,1	Nr. 3 und Nr. 5 zusammen
8	60,0	oberste Auftriebsfläche verdoppelt, alle anderen Auftriebe um 10 % erhöht
9	72,9	Seilfläche verdoppelt

Tabelle 13

Anteil der Auftriebselemente an der Gesamtfläche, der nicht mit dem der NEADS-Verankerungen vergleichbar ist. Außerdem kann das Stromprofil mit relativ hohen Geschwindigkeiten einen größeren Einfluß dieser Parameter vortäuschen, der nicht einfach auf andere Meßsysteme übertragbar ist.

Um allgemein gültige Aussagen machen zu können, bedarf es genauerer Untersuchungen mit den unterschiedlichsten Verankerungen und systematische Veränderungen der Parameter untereinander.

13. Literaturverzeichnis

1. Berteaux, H.O. (1970):

Design of Deep-Sea Mooring Lines
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 70 - 29

2. Berteaux, H.O. (1976):

Buoy Engineering
Wiley Interscience Publication
J. Wiley & Sons

3. Berteaux, H.O.; Chhabra, N.K. (1973):

Computer Programs for the Static Analysis of Single
Point Moored Surface & Subsurface Buoy Systems
W.H.O.I. Blue Cover Report No. 73-22
(unpublished manuscript)

4. Berteaux, H.O.; Walden, R.G. (1969):

Analysis & Experimental Evaluation of Single Point
Moored Buoy Systems
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 69 - 36

5. Berteaux, H.O.; Walden, R.G. (1970):

An Engineering Program To Improve The Reliability
Of Deep Sea Moorings
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 70 - 48

6. Bretschneider, C.I. (1969):

Topics in Ocean Engineering
Gulf Publishing Company Houston, Texas

7. Bronstein, I.; Semendjajew, K. (1976):
Taschenbuch der Mathematik, 16. Auflage
Verlag Harri Deutsch, Thun
8. Casarella, M.J.; Parsons, M. (1970):
Cable Systems Under Hydrodynamic Loading
Mar. Techn. Soc. Journ. 4, pp. 27-44
9. Dillon, D.B. (1973):
An Inventory Of Current Mathematical Models Of
Scientific Data-Gathering Moors
Hydrospace Challenger Inc., Rockville
HCI TR 4450 0001
10. Dietrich, G.; Kalle, K.; Krauss, W.; Siedler, G. (1975):
Allgemeine Meereskunde, 3. Auflage
Gebr. Bornträger, Berlin
11. Engelmann, H. (1972):
Untersuchungen an Komponenten für Tiefwasser-
verankerungssysteme
Kieler Meeresforschung XXVIII/2, pp. 119-129
12. Fofonoff, N.P. (1969):
"Buoy-system Motions"
in Handbook of Ocean and Underwater Engineering
McCraw Hill Book Comp.
13. Gerlach, E. (1980):
Zur Berechnung dynamischer Vorgänge in Trossen-
systemen bei Einsätzen auf See
Inst.f.Schiffbau der Univ. Hamburg
Bericht No. 400

14. Martin, W.D. (1968):

Tension And Geometry Of Single Point Moored
Surface Buoy Systems
A Computer Study
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 68 - 79

15. Moller, D.A. (1976):

A Computer Program For The Design And Static Analysis
Of Single Point Subsurface Mooring Systems
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 76 - 59

16. Müller, T.J. (1981):

Current and Temperature Measurements in the
North-East Atlantic during NEADS
Bericht aus dem Inst. f. Meereskunde an der Christian
Albrechts Univ. Kiel, No. 90

17. Pond, S.; Pickard, G.L. (1978):

Introductory Dynamic Oceanography
Pergamon Intern. Library

18. Prandtl, L. (1960):

Führer durch die Strömungslehre
F. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 5. Auflage

19. Sass, F.; Bouché, Ch. (1956):

Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer Verlag, 11. Auflage

20. Siedler, G.; Gerlach, E. (1976):

Verankerte Meßsysteme für die Tiefsee
Interocean '76, IO 76-355
NOWEA, Düsseldorf

- 21, Siedler, G.; Grashoff, G. (1970):

Tiefwasser-Verankerungssysteme des Instituts für
Meereskunde Kiel (technischer Bericht)
Kieler Meeresforschung XXVI/1, pp. 21-42

22. Skop, R.A.; O'Hara, G.J. (1970):

The Method Of Imaginary Reactions
Mar. Techn. Soc. Journ. 4, pp. 21-30

23. Tarbell, S.; Briscoe, M.G.; Weller, R.A. (1979):

A Compilation Of Moored Current Meter And Wind
Recorder Data
Vol. XVIII (JASIN 1978, Moorings 651-653)
W.H.O.I.
Ref. No. 79 - 65

24. Zenk, W. (1981):

Dehnungsversuche an Polyamidseilen
(11 mm Ø 'Meteor-Leine')
Techn. Bericht, Inst. f. Meereskunde Kiel